

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto
Pohjarakennus ja maamekaniikka

ELISE RUOHONEN

YLIJÄÄMÄSAVIEN KÄYTTÖ RAKENNUSTEKNIIKASSA

Työn valvoja: Prof. Olli Ravaska
Työn ohjaaja: DI Anton Palolahti

TEKNILLINEN KORKEAKOULU		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä:	Elise Ruohonen		
Diplomityön nimi:	Ylijäämäsavien käyttö rakennustekniikassa		
Päivämäärä:	5.12.2006	Sivumäärä:	116
Professori:	Pohjarakennus ja maamekaniikka	Koodi:	Rak-50
Työn valvoja:	Professori Olli Ravaska		
Työn ohjaaja:	DI Anton Palolahti		

Diplomityö on osa Suomen Akatemian rahoittamaa Clay Barriers -projektia, joka käynnistettiin keväällä 2006. Tutkimuksen tarkoitus on selvittää suomalaisen ylijäämäsaven hyötykäyttömahdollisuuksia pienillä sideainemäärillä. Akatemiaprojektissa keskitytään erityisesti saven käyttöön tiivisterakenteissa.

Diplomityössä käsitellään ylijäämäsavien syntyä ja erilaisia stabilointitekniikoita keskittyen lähinnä massastabilointiin. Lisäksi esitellään erilaisia saven stabiloimiseen käytettyjä sideaineita Suomesta ja maailmalta sekä kohteita, jotka on toteutettu stabiloitua savea hyödyntäen. Kohteista on otettu mukaan tiivisterakenteiden lisäksi tierakenteita ja täyttöjä. Jotta savea voidaan hyödyntää rakenteissa, on sen oltava koostumukseltaan helposti työstettävää. Suomalaiset savet ovat usein häirittyinä täysin juoksevia, joten työstettävän koostumuksen saavuttamiseksi saveen saatetaan joutua lisäämään sideainetta. Tiivistysrakenteissa käytettävän savelta vaaditaan myös riittävän pientä vedenläpäisevyyttä.

Työn osana tehtiin laboratoriokokeita E18-tien varrella sijaitsevan Lempolan eritasoliittymän lyijyllä saastuneiden ampumaratamaiden eristämistä varten. Tiivistemateriaalina kohteessa on suunniteltu käytettävän sementillä stabiloitua savea. Laboratoriokokeet tehtiin Teknillisen korkeakoulun Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa. Kokeissa kiinnitettiin erityishuomiota lujuus- ja vedenläpäisevyyskokeisiin.

Kokeita tehtiin sekä stabiloiduille että stabiloimattomille Lempolan savinäytteille, jotka otettiin kolmesta näytteenottopaikasta: sijoituspaikaksi suunnitellun ramppisilmukan keskeltä, läheiseltä peltoalueelta sekä läjitysalueelta, jolle oli tuotu tielinjalta kaivettua savea.

Ramppisilmukasta ja peltoalueelta otetuilla näytteillä oli pienempi vesipitoisuus ja suurempi saviprosentti kuin läjitysalueen savilla. Peltoalueen savinäyte saavutti suuren lujuuden, kun siihen sekoitettiin sementtiä kolme tai viisi prosenttia saven kuivapainosta. Kolmen prosentin sementtilisäyksellä saavutettiin seitsemän päivän lujittumisajalla tiivisterakenteille suositeltu 50 kPa:n leikkauslujuus. Ramppisilmukan ja peltoalueen saven vedenläpäisevyydet olivat pienet; vedenläpäisevyysödometrikokeissa havaittiin kaikkien testattujen savinäytteiden täyttävän vedenläpäisevyysvaatimuksen $k \leq 6,7 \times 10^{-10}$ m/s jo ilman kuormitusta ödometrikoeolosuhteista laskennallisesti saaduissa vedenläpäisevyysarvoissa. Läjitysalueen näytteet eivät saavuttaneet yhtä suuria lujuuksia tai pieniä vedenläpäisevyyksiä, mutta stabiloinnin ja tiivistyksen avulla niistäkin voidaan olettaa saatavan kelvollinen tiivistemateriaali.

Tiivistyskerroksen rakentaminen alkaa kesällä 2007. Sitä ennen valitaan parhaiten tiivistemateriaaliksi soveltuva savi, jolle tehdään lisälaboratoriokokeita.

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author:	Elise Ruohonen		
Thesis:	Utilising surplus clay in earth construction		
Date:	5.12.2006	Number of pages:	116
Professorship:	Soil mechanics and foundation engineering	Koodi:	Rak-50
Supervisor:	Professor Olli Ravaska		
Instructor:	M.Sc. (Civ.Eng.) Anton Palolahti		
<p>This study is a part of the Clay Barriers project launched in the beginning of the year 2006. The project is financed by the Academy of Finland. The aim of the project is to study the possibilities to utilise Finnish surplus clay by means of adding small amounts of cement in it. The project is particularly concentrating on the use of clay in impermeable barrier constructions.</p> <p>This work outlines the origins of the surplus clay and presents different techniques of mass stabilisation. Further, it lists some commonly used binding materials and also more rare additives. Finnish clays often behave like liquid when remoulded. To utilise such material in earth structures, stabilisation is needed to enable transportation and compression work. In barrier constructions low permeability of the clay is also an important matter. In this work, some building projects in the field of mass stabilisation are introduced, mainly covering road bases and barrier constructions.</p> <p>As a part of the study, clay samples from the motorway E18 construction site in Lempola were tested at the Laboratory of soil mechanics and foundation engineering. By the side of the motorway is an old shooting range with lead contaminated soil. The contaminated soil is planned to be deposited and encapsulated beside the slip road of the motorway. The clay taken near the motorway was tested whether it could be used as the barrier material. Especially strength and permeability characteristics were investigated.</p> <p>Tests were carried out with stabilised and unstabilised Lempola clay. The clay samples were taken from three locations: the first samples were taken from the deposit site near the slip road of the motorway, where the contaminated soil will be encapsulated, the second samples from the nearby field and the third ones from the site where clay from the road alignment had been dumped.</p> <p>The samples taken from the slip road and from the field had lower water content and higher clay content than the clay from the dumping site. The field clay reached very high strength when it was mixed with 3 or 5 % cement. In seven days even the clay with 3 % cement had shear strength of over 50 kPa, which is the target strength. Also, the field and slip road clays had low permeabilities; in permeability oedometer tests all the samples had a coefficient of permeability less than required $k \leq 6.7 \cdot 10^{-10}$ m/s even without loading. Clay samples from dumping site did not reach as high strengths or low permeabilities as the other samples but will probably work as barrier material after stabilisation and compaction.</p> <p>The construction works in Lempola will start in summer 2007. Before that the best clay material will be chosen and even more laboratory tests will be carried out to make sure the material is suitable.</p>			

Alkusanat

Diplomityöni on tehty Teknillisen korkeakoulun Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa. Se on osa keväällä 2006 alkanutta Clay Barriers -projektia, jossa tutkitaan suomalaisen saven stabilointia ja käyttöä tiivisterakenteissa.

Kiitän valvojaani, professori Olli Ravaskaa, laboratorioinsinööri Matti Lojanderia ja koko Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorion henkilökuntaa sekä ohjaajaani Anton Palolahtea avusta työni onnistumiseksi.

Nooraa, Annea ja Timoa kiitän kommentteista työni kieliasuun liittyen, sukulaisia ja ystäviä erityisesti työhuoneeni sisustamisesta savikakkutaululla sekä mielenkiinnosta työtäni kohtaan.

Tässä runo, jonka mummini oppi aapisestaan 30-luvulla Muolaassa, Kannaksella:

Naapurissa rakennettiin nyt
Eero, Heikki, Lauri rientänyt
kera Mustin ompi katsomaan
kuinka perus, seinät laitetaan.
Kalkki, savi aivan arvoton
sementtimme raaka-aineet on.

Toivon, että minun muistini osoittautuu yhtä hyväksi.

Espoossa 5.12.2006

Elise Ruohonen

Merkinnät

A	näytteen poikkipinta-ala, m^2
a	byretin poikkipinta-ala, m^2
A_v	virtauksen poikkileikkauspinnan ala, m^2
β_k	suhteellinen muodonmuutos-vedenläpäisevyyskuvaajan kulmakerroin puolilogaritmisella asteikolla
c_v	konsolidaatiokerroin, m^2/a
ε	suhteellinen muodonmuutos, %
e_0	huokosluku kokeen alussa
E_1	ensikuormitusmoduuli (Loadman), MPa
E_2	toistokuormitusmoduuli (Loadman), MPa
F	puristusvoima yksiaksisiaalisessa puristuskokeessa, kg
g	painovoiman kiihtyvyys, m/s^2
γ_w	veden tilavuuspaino, kN/m^3
h	veden painekorkeus, m
h_i	maanäytteen korkeus koevaiheen alussa, m
i	hydraulinen gradientti
K	maatyyppistä, lämpötilasta ja sideaineesta riippuva kerroin kypsyysfunktiossa
k	luonnontilaisen maan vedenläpäisevyyskerroin, m/s
k_{stab}	stabiloidun maan vedenläpäisevyyskerroin, m/s
k_1	laskennallinen kuormittamattoman näytteen vedenläpäisevyyskerroin ödometrikeessa, m/s
L	näytteen korkeus, m
M	kokoonpuristuvuusmoduuli, kPa
M_s	kypsyysaste
n_0	huokoisuus kokeen alussa, %
Q	virtaavan veden määrä, m^3/s

q	puristuslujuus, Pa
q_{uc}	stabiloidun maan yksiaksaalinen puristuslujuus, kPa
ρ	tiheys, t/m ³
ρ_d	kuivairtitiheys, t/m ³
ρ_{d0}	näytteen kuivairtitiheys kokeen alussa, t/m ³
ρ_0	näytteen tiheys kokeen alussa, t/m ³
S_r	näytteen kyllästysaste, %
T	lämpötila, °C
t	aika, s
t_d	aika, d
t_U	kokoonpuristumisasteen U saavuttamiseen kuluva aika, a
T_v	t_U :ta vastaava aikatekijä
V	veden virtausnopeus, m/s
w	luonnontilaisen maan vesipitoisuus, %
w_s	stabiloidun maan vesipitoisuus, %
x	etäisyyskoordinaatti virtauksen suunnassa, m

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
MERKINNÄT	5
SISÄLLYSLUETTELO	7
1 JOHDANTO	10
2 YLIJÄÄMÄMAAT	12
2.1 Ylijäämämaa – ongelma?	12
2.2 Clay Barriers -projekti	13
3 STABILOINTI	15
3.1 Miksi rakennetaan heikoille rakennuspohjille?	15
3.2 Massastabilointi	16
3.3 Pilaristabilointi	20
3.4 Pintastabilointi	21
4 SIDEAINEET	23
4.1 Sideaineet maaperässä	23
4.2 Erilaisia sideaineita	24

4.2.1	Sementti	24
4.2.2	Kalkki	28
4.2.3	Tuhkat	31
4.2.4	Masuunikuona	37
4.2.5	Rikinpoiston lopputuote	39
4.2.6	Muita stabiloinnissa käytettyjä side- ja lisäaineita	39
4.3	Stabiloinnin vaikutus vedenläpäisevyyteen – yhteenveto	42
5	MASSASTABILOIDUN SAVEN KÄYTTÖ RAKENNUSKOhteissa	45
5.1	Käytön edellytyksiä	45
5.1.1	Laatuvaatimukset	45
5.1.2	Tiivistettävyyden, lujuuden, työstettävyyden	45
5.1.3	Vedenläpäisevyys	47
5.1.4	Ympäristökelpoisuus	49
5.2	Toteutettuja rakennushankkeita	49
5.2.1	Tiivistysrakenteet	49
5.2.2	Tierakenteet	53
5.2.3	Täytöt ja pengerrakenteet	59
5.3	Ylijäämäsavien hyödyntäminen tulevaisuudessa	62
6	LABORATORIOTUTKIMUSMENETELMÄT	64
6.1	Tutkimukset ja näytteet	64
6.2	Koekappaleiden valmistus	64
6.2.1	Vedenläpäisevyysödometrikokappaleet	64
6.2.2	Puristuskokappaleet ja vesipitoisuusnäytteet	65
6.2.3	Muiden kokeiden valmistelu	70
6.3	Laboratoriotutkimukset	71
6.3.1	Luokitusominaisuudet	71
6.3.2	Vedenläpäisevyysödometrikoe	72
6.3.3	Yksiaksiaalinen puristuskoe	75
6.3.4	Proctor-koe	77

7	LEMPOLAN SAVI	78
7.1	Lempolan rakennushanke	78
7.2	Lempolan saven laboratoriokoetulokset ja tulosten tarkastelu	80
7.2.1	Savinäytteet ja peruskäsittely	80
7.2.2	Vedenläpäisevyysödometri	83
7.2.3	Yksiaksiaalinen puristuskoe	91
7.2.4	Proctor-koe	101
8	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	104
	LÄHDELUETTELO	108
	LIITTEET	114

1 Johdanto

Rakentamisessa syntyy maaleikkausten ja massanvaihtojen seurauksena ylijäämämaita. Täyttöjen, pengerryksien ja muiden maarakenteiden tekemisessä taas tarvitaan maamasoja. Ylijäämämaista hiekka- ja soramaat on helppo hyödyntää erilaisissa rakennuskoh-teissa. Yli jääneet savimassat sen sijaan läjitetään useimmiten maakaatopaikoille.

Nykyään rakennetaan yhä enemmän savikoille, jolloin joudutaan käyttämään esimerkiksi pohjanvahvistusta tai tekemään massanvaihto. Pääkaupunkiseudun maakaatopaikat ovat täyttyvässä, joten ylijäämäsaville on tarpeen kehittää uusia hyödyntämismuotoja.

Saven käsittelyssä ja hyödyntämisessä ongelmana on sen häiriintymisherkkyys. Savimas-sa saattaa kuljetettaessa käyttäytyä nesteen tavoin. Tällöin sen hyödyntäminen rakenteissa on vaikeaa, koska tiivistäminen on mahdotonta. Savimassojen ollessa juoksevia myös niiden vaatima läjityspinta-ala maakaatopaikoilla on suuri.

Saven massastabiloinnilla on mahdollista saada aikaan massa, jonka käsitteleminen maa-rakennuskoneilla on mahdollista ja läjittäminen helpompaa. Tällaista savea voidaan käyt-tää erilaisissa rakenteissa. Lisäksi saven pientä vedenläpäisevyyttä voidaan hyödyntää esimerkiksi kaatopaikkojen tiivistysrakenteissa, kun savi saadaan stabiloimalla käsiteltä-vään muotoon.

Stabiloinnissa voidaan käyttää sekä teollisuuden tuotteita että sivutuotteita. Sivutuottei-den käytöllä kahdesta jättemateriaalista on mahdollista saada kelpollinen rakennusmateri-aali.

Diplomityön tavoitteena oli selvittää ylijäämäsaven käyttömahdollisuuksia ja -edellytyk-siä rakennustekniikassa.

Kirjallisuuden avulla perehdyttiin maarakennushankkeisiin, joissa on käytetty stabiloitua savea ja selvitettiin, millaisten sideainevaihtoehtojen ja -määrien käyttöä Suomessa ja maailmalla on testattu.

Diplomityön osana tehtiin laboratoriokokeita E18-tien varrella sijaitsevan Lempolan eritasoliittymän lyijyllä saastuneiden ampumaratamaiden eristämistä varten. Tiivistemateriaaliksi oli valittu sementillä stabiloitu savi. Kokeet tehtiin Teknillisen korkeakoulun Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa. Kokeiden tarkoituksena oli selvittää riittävän lujuuden saavuttamiseen tarvittava sideainemäärä sekä sideainelisäyksen vaikutus saven vedenläpäisevyyteen.

2 Ylijäämämaat

2.1 Ylijäämämaa – ongelma?

Maarakennustöissä syntyy ylijäämämaita, joita ei materiaalin huonojen rakennusgeologisten ominaisuuksien vuoksi hyödynnetä rakennustoiminnassa. Tällä hetkellä Helsingissä syntyy vuosittain arviolta miljoona kuutiometriä ylijäämämaita. (SITO, 2005) Koko pääkaupunkiseudulla ylijäämämassoja tuotetaan kolminkertainen määrä eli noin kolme miljoonaa kuutiometriä vuodessa. Pääkaupunkiseudulla syntyvistä ylijäämämaista noin kolmannes on savia ja liettyviä maa-aineksia. (SITO, 2005; Lahtinen ym., 2005)

Ylijäämäsaveä on osin niin liettyvää ja heikosti kantavaa, että sen kuljettaminen ja tiivistäminen rakenteisiin on hankalaa. Täyttömäkien rakentaminen tällaisesta maa-aineksestä on vaikeaa; levitessään laajalle alueelle saveä vaatii paljon läjityspinta-alaa tai vaihtoehtoisesti parempilaatuisesta aineksestä tehdyt reunapenkereet. Perinteisesti savimaasta on käytetty hyödyksi ainoastaan helposti työstettävä kuivakuori.

Jätelaki luokittelee ylijäämämaan jätteeksi, jos maa-aineksen haltija on poistanut tai aikoo poistaa massat käytöstä (Jätelaki, 1993). Puhtaat ylijäämämaat sijoitetaan yleensä kunnallisille maakaatopaikoille tai läjitysalueille. Jätteen laitospäiseen käsittelyyn tarvitaan Suomessa ympäristölupa. Lupa ei kuitenkaan koske maa-ainesten ottamisessa syntyvän pilaantumattoman aineksen hyödyntämistä. (Lahtinen ym., 2005) Pääkaupunkiseudulla ongelmana on ylijäämämaan sijoituspaikkojen täyttyminen. Uusia sijoituspaikkoja etsitään mm. Helsingin kaupunginjohtajan asettaman ylikunnallisen ylijäämämassatyöryhmän voimin.

Ympäristöministeriö on viime vuosikymmenen aikana kehittänyt infrarakentamisen uutta materiaaliteknologiaa, UUMA-teknologiaa: ylijäämämaa- ja kiviaineksien sekä teollisuuden sivutuotteiden, pilaantuneiden maiden ja vanhojen maarakenteiden hyötykäyttöteknologiaa. Tavoitteena on merkittävästi vähentää luonnokiviaineksen käyttöä kohteissa, joissa voidaan hyödyntää muita materiaaleja. (Lahtinen ym., 2005)

Ylijäämäsavien hyödyntämällä vähennetään sijoituspaikkoihin kohdistuvaa kuormitusta ja toisaalta säästetään uusiutumattomia hiekka- ja soravaroja. Jos savien ominaisuuksia parannetaan esim. stabiloinnilla, maa-aines on mahdollista läjittää korkeammiksi kasoiksi ja säästää läjityspaikkojen pinta-alassa. Ylijäämäsavien vähentyneiden kuljetuskilometrien myötä saavutetaan säästöjä kuljetuskustannuksissa.

2.2 Clay Barriers -projekti

Tämä diplomityö on osa Suomen Akatemian rahoittamaa Clay Barriers -projektia, joka käynnistettiin vuoden 2006 alussa. Ajatus akatemiaprojektista sai alkunsa Kivikon kaatopaikan rakentamisen yhteydessä suoritetusta pienimuotoisemmasta tutkimuksesta. Kivikko-projektin yhteydessä havaittiin tarve laajemmalle tutkimukselle.

Vuonna 2001 Espoossa rakennettiin suurta kauppakeskusta. Työmaalla syntyi ylijäämämaana savea, joka oli tarkoitus läjittää hyödyttömänä materiaalina. Samaan aikaan Kivikossa rakennettiin pilaantuneen maan kaatopaikkaa. Syntyi ajatus kauppakeskuksen ylijäämäsavien hyödyntämisestä Kivikon kaatopaikan tiivistyskerroksen materiaalina.

Työstettävyyden parantamiseksi saveen oli lisättävä sideainetta. Tutkimukset saveen ominaisuuksien ja tarvittavan sideaineen sekä -ainemäärän selvittämiseksi tehtiin Teknillisen korkeakoulun Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa. Tulosten perusteella sideaineeksi valittiin sementti. Lisäämällä saveen $30\text{--}90 \text{ kg/m}^3$ (1,8...5,6 % maa-aineksen painosta) sementtiä, savimassa saatiin työstettävään lujuteen. Laboratorioko-keet osoittivat vedenläpäisevyyden näillä sideainemäärillä riittävän pieneksi – 18 näytteen keskimääräinen vedenläpäisevyys oli $4,7 \times 10^{-10} \text{ m/s}$, joka on pienempi kuin kaatopaikan tiivistyskerrokselta vaadittu 10^{-9} m/s . Vain yhden näytteen vedenläpäisevyys oli raja-arvoa suurempi.

Tiivisterakenne toteutettiin kesän ja syksyn 2001 aikana. Valvonnalla ja näytteidenotolla varmistettiin rakenteen tiiviys, kantokyky, paksuus, kerroksen tasaisuus ja vedenläpäisevyys.

Kivikko-projektin stabilointitutkimus oli pienimuotoinen; siinä käytettiin ainoastaan yhdestä lähteestä peräisin ollutta savea. Projektista syntyi ajatus jatkaa tutkimusta savien hyötykäytöstä ja työstettävyyden parantamisesta pieniä sideainemääriä käyttäen. Akateмиaprojektissa keskitytään erityisesti saven käyttöön tiivisterakenteissa. Stabiloidun saven tärkeimmät ominaisuudet tiivisterakennekäytössä ovat lujuus, joka vaikuttaa työstettävyyteen, sekä vedenläpäisevyys. Tarkoituksena on tutkia erilaisilla sideaineilla ja sideainemäärillä saavutettavia tuloksia.

Vuosien 2006...2008 aikana TKK:n laboratoriossa tutkitaan häiriintymättömien, häirittyjen ja erilaisilla sideaineilla ja sideainemäärillä stabiloitujen näytteiden ominaisuuksia. Sideaineina tullaan käyttämään sementtiä ja akryylihartsia sekä mahdollisesti muita kirjallisuudessa esiintyviä lisäainevaihtoehtoja. Lisäaineita käsittelevä kirjallisuustutkimus toteutetaan osana tätä diplomityötä.

3 Stabilointi

3.1 *Miksi rakennetaan heikoille rakennuspohjille?*

Rakennushankkeet sijoittuvat yhä useammin huonosti kantaville maaperille, jotka vaativat vahvistustoimenpiteitä. Kaupunkirakenteen tiivistäminen mm. Helsingin kantakaupungissa johtaa pohjasuhteiltaan epäedullisten ja rakenneratkaisuiltaan kalliiden tonttien käyttöönottoon. Myös teitä ja rautateitä rakennetaan yhä useammin huonosti kantaville pohjamaille. (Jelusic, 2000; Karlstedt, 1993) Mikäli maaperä ei luonnontilassaan ole rakennuspohjaksi sopiva, tai rakentaminen on liian kallista, vaihtoehtoina ovat maa-aineksen korvaaminen ominaisuuksiltaan paremmalla materiaalilla taikka maaperän ominaisuuksien parantaminen vaatimuksia vastaaviksi esimerkiksi stabiloimalla.

Heikoiksi rakennuspohjiksi luokitellut maat on perinteisesti vaihdettu esim. kitkamaihin. Massanvaihdesta aiheutuu kuljetuskustannuksia, ylijäämämaiden läjityspaikkojen täyttymistä, uusiutumattomien soravarojen kulumista sekä edellä mainituista syistä ympäristö- ja maisemahaittoja. Stabiloinnin avulla on mahdollista vähentää kuljetuksista, massojen korvaamisesta ja läjittämisestä aiheutuvia kustannuksia ja ympäristökuormituksia. (Karlstedt, 1993)

Stabilointi on menetelmä, jolla parannetaan maa-aineksen ominaisuuksia ja ehkäistään rakennuspohjassa rakentamisen ja käytön aikana mahdollisesti tapahtuvia epätoivottuja muutoksia. Stabiloinnilla parannetaan maan lujuutta ja kestävyyttä, vähennetään maaperässä tapahtuvia tilavuuden muutoksia ja vaikutetaan maan vedenläpäisevyyteen. Stabiloinnissa maa-ainekseen sekoitetaan tarvittava määrä sideainetta. Tyypillisimpiä sideaineita ovat kalkki, sementti sekä näiden sekoitus. Stabilointiin käytetään myös teollisuuden sivutuotteita, kuten lentotuhkaa.

3.2 Massastabilointi

Viime vuosina yleistyneessä maa-ainesten massastabiloinnissa sideaine sekoitetaan mahdollisimman tasaisesti koko käsiteltävään maakerrokseen. (Ideachip Oy, 2006) Pehmeät savi-, turve- ja liejuserroksot on mahdollista massastabiloida kantavaksi rakennuspohjaksi. Pilaantuneet maa-ainekset voidaan kiinteyttää stabiloimalla. Massastabilointi vähentää erityisesti raskasmetallien liukoisuutta maassa olevaan veteen (Rekonen, 1993). Stabiloitua savea on mahdollista käyttää myös tiivisterakenteissa, esim. pilaantuneen maan kapseloinnissa, sekä täyttömateriaalina ja tien pohjamateriaalina (Ravaska ym., 2003; Mäkelä ym., 2000a). Massastabilointia on lisäksi mahdollista käyttää esimerkiksi kantavien työpetien rakentamisessa, kaivantojen tuennassa ja eroosion estämisessä. Stabiloidusta savesta toteutettuja rakenteita käsitellään kappaleessa 5.

Massastabilointi voidaan toteuttaa in-situ, sekoittamalla sideaine luonnontilaiseen maa-ainekseen sen alkuperäisessä sijaintipaikassa. Stabiloitavan maakerroksen paksuus voi olla jopa viisi metriä. (Jelusic, 2000; Ideachip Oy, 2006; Rekonen, 1993) Kun sideaine on sekoitettu, stabiloitu maa-aines kaivetaan ylös ja kuljetetaan välivarastoon tai suoraan käyttökohteeseen. (Mäkelä ym., 2000b) In-situ -stabiloinnissa laitteistona käytetään esimerkiksi kaivinkoneeseen liitettyä sekoitinyksikköä. ALLU Power Mix -laitteella sekoitus tapahtuu pyörivillä rummuilla ja sideaine syötetään paineilmasyöttimen avulla maahan rumpujen lähelle. Kaivinkoneeseen liitetty sekoitinyksikkö sekä paineilmasyöttin esitetään kuvassa 1. (Ideachip Oy, 2006)

Sijaintipaikallaan massastabiloitu maa-aines voidaan myös tiivistää suoraan paikalleen. Tällaista menetelmää käytettiin Ruotsissa maantien pohjamaan vahvistamiseen. Pohjamaa koostui pääasiassa liejusta ja turpeesta. (Rogbeck, 1997)



Kuva 1 Kaivinkone ja sekoitinyksikkö, etualalla painesyötin (Ideachip Oy, 2006)

Ex-situ-massastabiloinnissa maa-aines kaivetaan ylös ja siirretään käsiteltäväksi esimerkiksi varta vasten ylijäämämassojen käsittelyyn varatulle operointialueelle (SITO, 2005). Läjitettyyn massaun sekoitetaan sideaine esimerkiksi aumasekoittimella tai seulamurskaimella, kuvat 2 ja 3. Aumasekoitinta käytettäessä stabiloitava maa-aines on kasattava aumaksi, jonka yli sekoitin kulkee joko itse tai traktorin vetämänä. Sideaine voidaan syöttää aumaan sekoituksen aikana. Koska käsiteltävä maa-aines on ennen sekoitusta muotoiltava aumaksi, menetelmä ei sovellu sensitiivisen saven käsittelyyn. Seulamurskain voidaan kiinnittää erilaisiin hydraulisiin kauhakoneisiin kauhan tilalle. Seulamurskain soveltuu stabilointiin sekä maa-aineksen ollessa kuopassa että penkereeksi muotoiltuna. Sideaine annostellaan valmiiksi stabiloitavaan maahan. (Ideachip Oy, 2006; Rekonen, 1993) Myös pilaristabilointilaitteen soveltuvuutta läjitetyn savimaan massastabilointiin on kokeiltu hyvällä menestyksellä. (Forsman & Hakari, 2004 ja 2006)

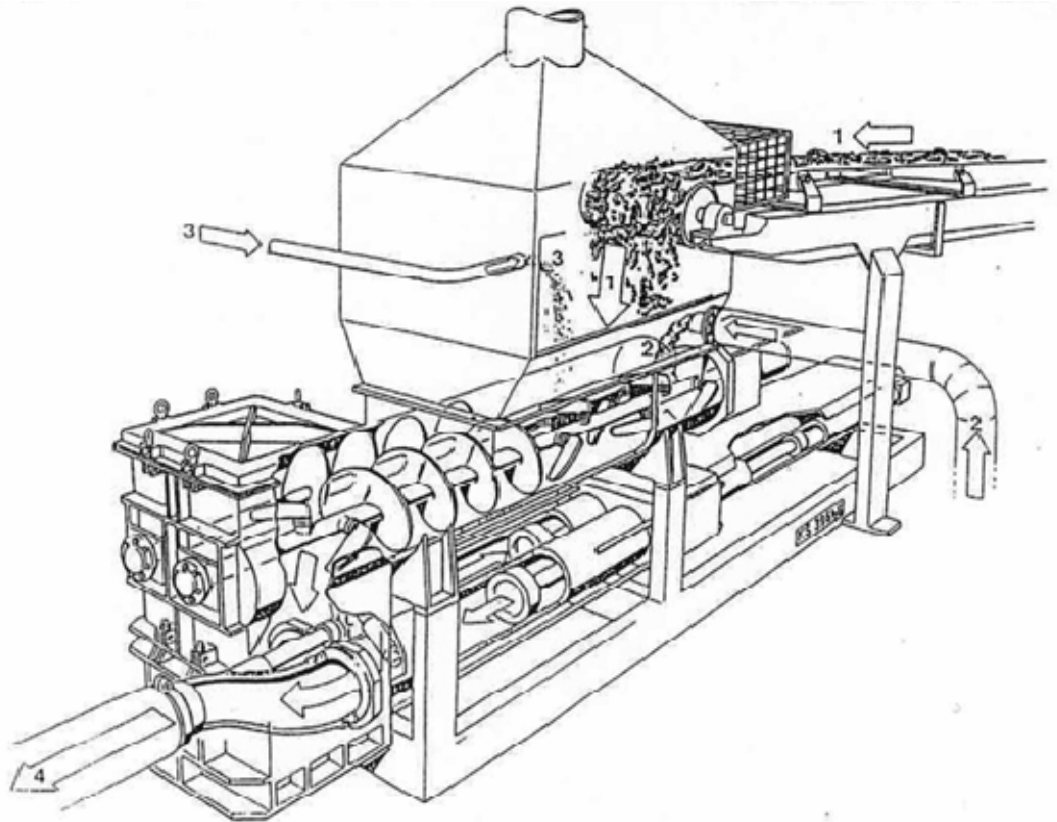


Kuva 2 Aumasekoitin (Ideachip Oy, 2006)



Kuva 3 Seulamurskain (Ideachip Oy, 2006)

Sideaineen lisääminen voi tapahtua myös asemasekoituksena, kuva 4. Maa-aines syötetään sekoittimeen hihnakuljettimella, sideaineet putkia pitkin. Murskain ja ruuvikuljetin sekoittavat massan, joka pumpataan kuorma-autoon tai suoraan välivarastoon. (Karlstedt, 1993)



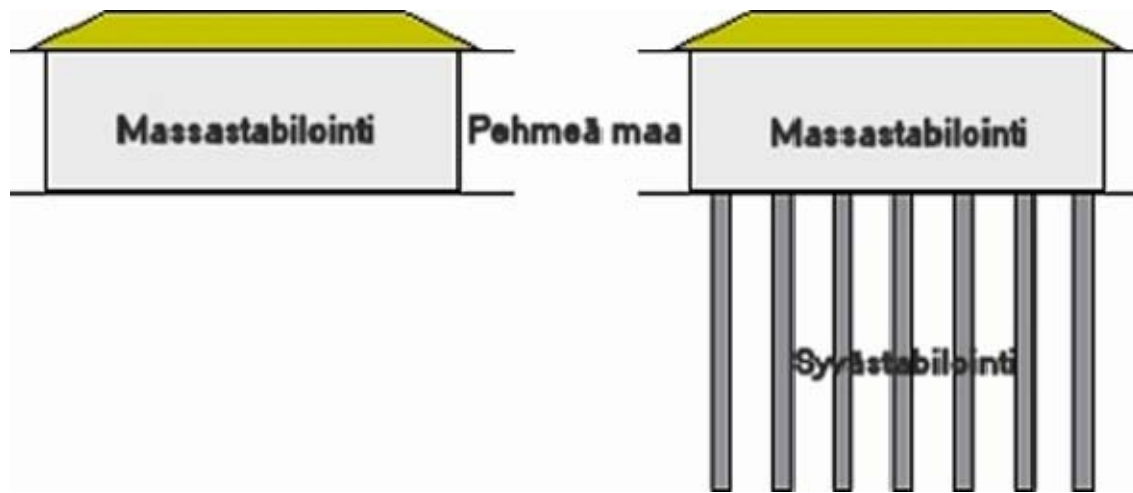
Kuva 4 Asemastabilointilaitteisto (Karlstedt, 1993)

Ex-situ-massastabiloitava savi voi päätyä rakenteisiin usealla tavalla. Savi voidaan kaivaa, stabiloida työmaalla ja tiivistää rakenteeseen. Savea voidaan myös varastoida sekä kaivamisen että stabiloimisen jälkeen työmaalla tai varastointialueella.

Stabiloidun massan säilytykselle annettuja aikarajoja on noudatettava. Liian pitkä varastointiaika johtaa maamassan kovettumiseen, jolloin kuormaus, levitys ja tiivistys vaikeutuvat. Jos kovettumisaika on liian lyhyt, massa saattaa jäädä liian veteläksi. Stabiloidun massan tiivistys suoritetaan yleensä sorkkajyrällä. Stabiloidun savikerroksen rakentaminen voidaan aloittaa, kun massa on niin jäykkää, että se kestää työkoneet. (Mäkelä ym., 2000b)

Maa-aineksen kaivu, siirrot, sideaineen sekoitus ja kerrosten rakentaminen muodostavat osansa massastabiloinnin kustannuksista. Suurin kustannuserä on kuitenkin sideaineiden hankinta. Kustannussäästöjä voidaan saavuttaa esimerkiksi kasvattamalla sivutuotteiden

osuutta sideainemäärästä ja käyttämällä tehokkaampaa sekoitustekniikkaa, jolloin sideainetta tarvitaan vähemmän. (Mäkelä ym., 2000b)



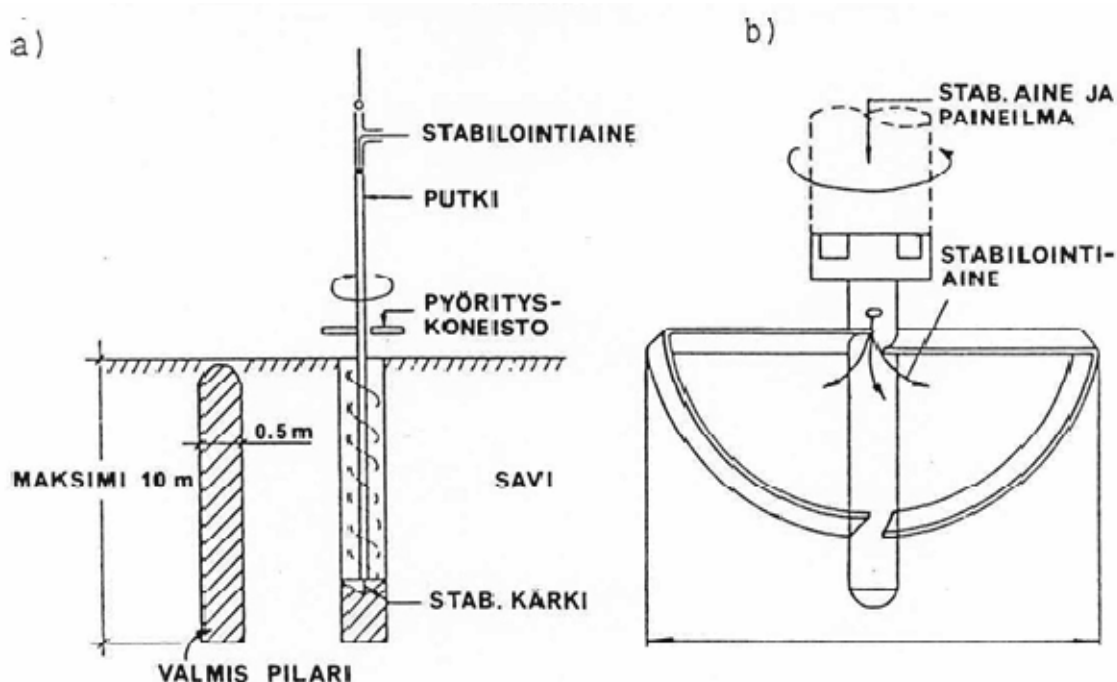
Kuva 5 Massastabilointi sekä yhdistetty massa-syvästabilointi (Ideachip Oy, 2006)

Massastabilointi on mahdollista yhdistää pilaristabiloinnin kanssa. Kuvassa 5 esitetään massastabiloinnin ja yhdistetyn massa-syvästabiloinnin periaatteet. Stabilointitekniikoiden yhdistäminen on taloudellinen vaihtoehto: menetelmissä on usein mahdollista käyttää samoja sideaineita. Yhdistetty massa-syvästabilointi toteutetaan tekemällä ensin pilarit ja sen jälkeen massastabilointi. (Mäkelä ym., 2000b)

3.3 Pilaristabilointi

Pilaristabiloinnissa maa-aineksesta ja sideaineesta sekoitetaan maahan pilareita. Pilareiden väliin jää maa-ainesta, joka ei sisällä sideainetta. Jännitykset jakautuvat pilareille ja niitä ympäröivälle maalle. Pilarit ovat halkaisijaltaan 500...800 mm, nykyään tyypillisimmin 600...700 mm. (Tiehallinto, 2001)

Pilarit tehdään upottamalla pilarointikoneen sekoitin valmistettavan pilarin alapään tasoon. Sideaineen syöttö ja pilarin sekoittaminen tapahtuvat, kun sekoitin vedetään ylös. Sideaineen syöttö tapahtuu joko kuiva- tai märkämenetelmällä – kuivamenetelmä on Suomessa suositumpi. Pisimmillään pilarit voidaan ulottaa n. 20 metrin syvyyteen. (Tiehallinto, 2001) Kuvassa 6 esitetään pilarin valmistuksen periaate sekä sekoitinkärki.



Kuva 6 a) Pilarointi b) sekoituskärki (Karlstedt, 1993)

Pilaristabiloinnin sideaineina käytetään kalkkia, sementtiä tai kalkki-sementtiseosta (Åhnberg ym., 1995). Pilaristabiloinnissa on kokeiltu myös teollisuuden sivutuotteiden käyttöä sideaineina. (Tiehallinto, 2001)

3.4 Pintastabilointi

Pintastabiloinnissa maan pintakerros vahvistetaan 0,3...0,4 metrin syvyydeltä sekoittamalla maahan sideainetta. Sideaineena käytetään esim. bitumia tai sementtiä. Pintastabilointia käytetään pohjavahvistusmenetelmänä vähäliikenteisten teiden, katujen ja piha- sekä varastoalueiden rakentamisessa. (Karlstedt, 1993; Rekonen, 1993)

Maa-aines ja sideaine sekoitetaan joko sekoitusasemalla tai rakennuspaikalla. Kuvassa 7 on siirrettävä sekoitusasema. Mikäli sideaineena käytetään sementtiä, syntyvää massaa kutsutaan maabetoniksi. (Finnsementti Oy, 2006). Paikalla suoritettavan pintastabiloinnin työvaiheet ovat sideaineen levitys, sekoittaminen, tiivistys ja lujittumisvaihe. Pintastabilointi soveltuu myös teiden kunnostukseen: päällystekerros voidaan jyrsiä pintakerroksen mukana. (Portland Cement Association, 2006)



Kuva 7 Maabetonin sekoittamiseen tarkoitettu siirrettävä betoniasema (Finnsementti Oy, 2006)

4 Sideaineet

4.1 Sideaineet maaperässä

Suomessa ja maailmalla on testattu ja käytetty monia erilaisia stabiloinnin side- ja lisäaineita sekä aineyhdistelmiä. Osa aineista on teollisesti valmistettuja ja osa teollisuuden sivutuotteita. Maailmanlaajuisesti eniten käytetyt stabilointiaineet ovat kalkki ja sementti. Yleisesti käytettyjä teollisuuden sivutuotteita ovat esimerkiksi kivihiilen lentotuhka ja terästeollisuuden kuonat. Teollisuuden sivutuotteiden hyödyntämistä stabiloinnissa sekä yhdistämistä edellä mainittuihin sideaineisiin on kokeiltu useissa hankkeissa kustannusten pienentämisen toivossa. Sivutuotteiden käytön lisäämisellä halutaan myös vähentää kaato- ja läjityspaikoille päätyvän jätteen määrää (mm. Attom & Al-Sharif, 1998).

Yleisesti stabiloinnin tarkoituksena on kasvattaa maan lujuutta. Lujuuteen vaikuttavat käytetty sideainetyyppi sekä stabiloitavan maaperän ominaisuudet. Lisäksi lujuuden kehittymiseen vaikuttavat sideainemäärä, lujittumisaika, sekoitustapa ja -aika, lämpötila sekä lujittumisaikana vaikuttava jännitys. Maaperä lujittuu, kun maan huokostila täyttyy sideaineen ja maan reaktiossa syntyvistä reaktiotuotteista. Teoreettisesta syntyvien reaktiotuotteiden määrästä voidaan arvioida stabiloidun maaperän lujuus. Arvio on kuitenkin vain suuntaa-antava; maaperässä saattaa olla kemiallisia reaktioita edistäviä tai hidastavia kemikaaleja ja samantyyppiset reaktiotuotteet saattavat olla erilaisia lujuudeltaan. Lisäksi sideaineet reagoivat eri tavalla suhteessa maaperään. (Åhnberg, 2006)

Sideaineen vaikutus maaperän vedenläpäisevyyteen riippuu sideaineen vaikutustehosta, lujittumisajasta, stabiloidun massan makrorakenteesta ja jännitysolosuhteista. Laboratoriossa ja kentällä saadut vedenläpäisevyydet saattavat poiketa erittäin paljon toisistaan ja laboratoriossa saatua arvoa voidaankin pitää alarajana. Heti sideaineen sekoittamisen jälkeen ioninvaihdosta johtuva kokkaroituminen saattaa aiheuttaa vedenläpäisevyyden kasvua maamassassa. Reaktiotuotteiden määrän kasvaessa ja maan huokostilan täytyessä

maan lujuus kasvaa ja usein vedenläpäisevyys pienenee samassa suhteessa. (Åhnberg, 2006)

Sideaineiden lisääminen maaperään aiheuttaa myös mm. maan vesipitoisuuden laskua. Vesipitoisuuden pienenemisen aiheuttavat maahan sekoitettavat sideainepartikkelit ja veden sitoutuminen kemiallisissa reaktioissa. Vettä saattaa myös haihtua sideaineen sekoutusprosessin aikana. Lisäksi maan kyllästysaste laskee. Muita sideainelisyksen vaikutuksia ovat esimerkiksi muodonmuutosominaisuuksien sekä juoksu- ja plastisuusrajan muuttuminen ja maan tiheyden kasvu. (Åhnberg, 2006)

Teknisten seikkojen lisäksi sideainevalintaan vaikuttavat taloudelliset ja ympäristölliset syyt. Yksi sideaine ei välttämättä tuota parhaita tuloksia kaikkialla, vaan tulos vaihtelee maatyypin mukaan. Paras sideaineyhdistelmä ei myöskään aina ole se, joka tuottaa nopeimmin suurimman lujuuden. Kun stabiloidun maan lujuus on pienempi, maa-aines saattaa esimerkiksi toimia paremmin suhteessa ympäröivään stabiloimattomaan maahan. Myös stabilointituloksen kestävyys vaikuttaa sideainevalintaan, erityisesti alueilla, joilla on voimakkaasti virtaavaa pohjavettä. (Åhnberg, 2006)

4.2 Erilaisia sideaineita

4.2.1 Sementti

Sementillä stabiloitua maa-ainesta voidaan käyttää mm. tienrakennuksessa (Mäkelä ym., 2000a) ja kaatopaikkojen tiivistysrakenteissa (Ravaska ym., 2003) Jo hyvin pienet sementtipitoisuudet, esim. alle kaksi prosenttia maa-aineksen painosta, muuttavat maan ominaisuuksia. Sementtipitoisuuden ollessa viidestä kymmeneen prosenttia, maa käyttäytyy kuin betoni. Sementtistabilointi mm. kasvattaa maan lujuutta ja kantokykyä, sekä jäätymiskestävyyttä. (Ingles & Metcalf, 1972)

Sementti on hydraulinen sideaine, joka reagoi veden kanssa muodostaen lujittuvaa massaa. Tavallisimmin käytetty sideainesementti on Portland-sementti. Se valmistetaan Portland-klinkkeristä ja kipsistä. (Åhnberg ym., 1995) Klinkkeri tehdään kalkista ja savesta, sintraamalla seos noin 1450 celsiusasteessa. Klinkkeriin sekoitetaan noin 5 % kipsiä ja

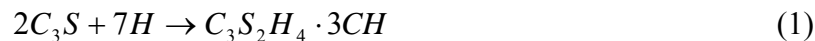
seos jauhetaan 1...100 mikrometrin partikkelikokoon. Sementin ominaispinta-ala on tällöin noin 300...550 m²/kg. Sementin reaktiivisuus on sitä suurempi, mitä suurempi sen ominaispinta-ala on. (Janz & Johansson, 2002) Sementin tiheys on 1,2 t/m³ (Karlstedt, 1993). Portland-sementin tyypillinen koostumus esitetään taulukossa 1.

Taulukko 1 Portland-sementin tyypillinen koostumus (Janz & Johansson, 2002)

Oksidi	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Pitoisuus [%]	60-70	17-25	2-8	0-6	0-6	1-4	0,2-1,5	0,2-1,5

Sementin tärkeimmät reaktiiviset mineraalit ovat trikalsiumsilikaatti 3CaO*SiO₂ (C₃S), dikalsiumsilikaatti 2CaO*SiO₂ (C₂S), trikalsiumaluminaatti 3CaO*Al₂O₃ (C₃A) ja tetra-kalsiumaluminaattiferriitti 4CaO* Al₂O₃Fe₂O₃ (C₄AF). (Åhnberg ym., 1995). Näistä kaksi kalsiumsilikaattia, C₃S ja C₂S, ovat tärkeimmät stabiloitumisen kannalta. (Prusinski & Bhattacharja, 1999)

Kun sementti sekoitetaan maa-ainekseen, ensimmäisenä alkavat reaktiot sementin ja maan sisältämän veden välillä. Seoksen pH kasvaa noin kolmeentoista, kun reaktioissa muodostuu kalsiumhydroksidia. (Åhnberg ym., 1995) Kalsiumsilikaatit reagoivat veden kanssa kaavojen (1) ja (2) mukaan muodostaen maamassaa lujittavaa kalsiumsilikaattihydraattigeeliä. (Janz & Johansson, 2002)



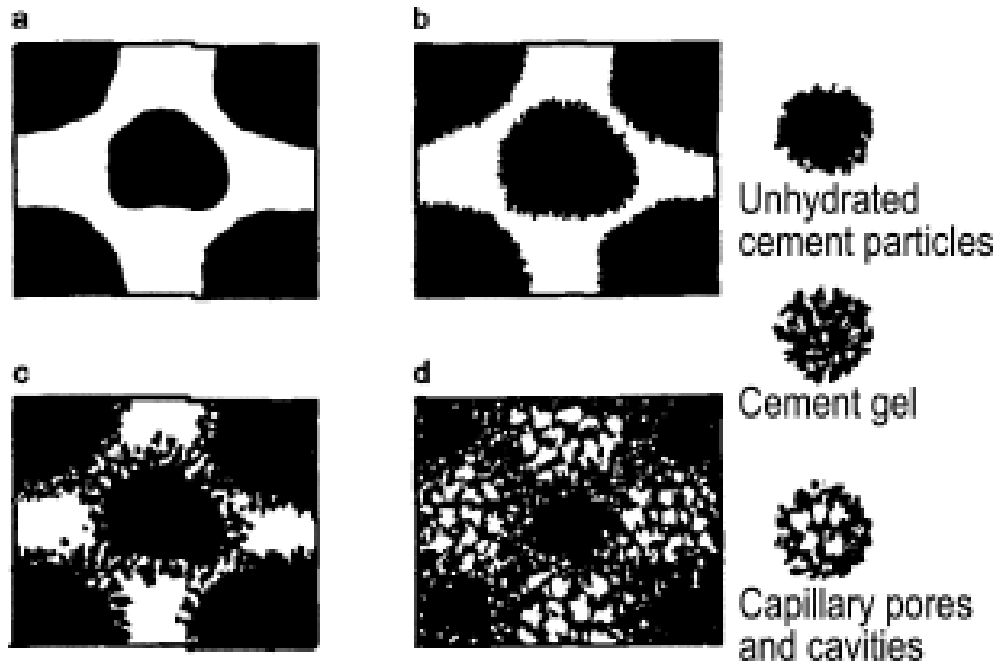
C₃S on 3CaO*SiO₂, trikalsiumsilikaatti
H H₂O, vesi
CH Ca(OH)₂, kalsiumhydroksidi
C₃S₂H₄ kalsiumsilikaattihydraattigeeli



C₂S on 2CaO*SiO₂, dikalsiumsilikaatti, muut kuten kaavassa (1)

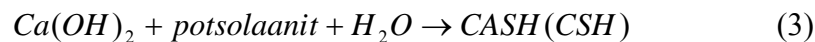
Kun sementtiä käytetään sideaineena, yksi tärkeimmistä parametreista on sekoitettavan massan vesi-sementtisuhde (kg/kg). Hydrataatiossa muodostuva kalsiumsilikaattihydraattigeeli täyttää reaktion edetessä partikkelien välisiä huokosia ja lujittuu vähitellen, kuva 8. Jos vettä on sementtiin nähden paljon, sementtipartikkelien etäisyydet ovat suuret ja

muodostuva massa on huokoisempaa ja lujuudeltaan heikompaa kuin pienemmällä vesi-sementtisuhteella valmistettu massa. (Janz & Johansson, 2002)



Kuva 8 Sementtigelin rakenne: a) heti sideainelisäyksen jälkeen, b) muutaman minuutin kuluttua, c) sitoutumisen käynnistyttyä ja d) muutaman kuukauden kuluttua (Janz & Johansson, 2002)

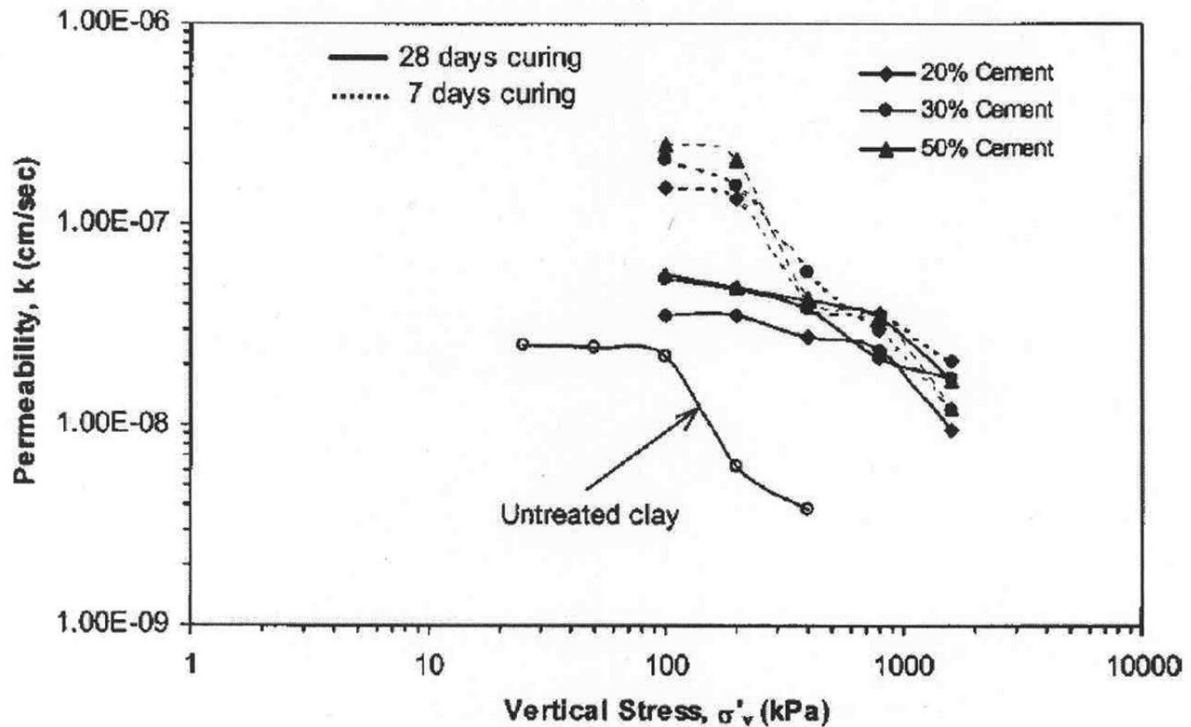
Veden ja sementin reaktion jälkeen stabiloidun maan lujittuminen jatkuu hitaamman potsolaanireaktion vaikutuksesta. Veden ja sementin reaktiossa muodostunut kalsiumhydroksidi reagoi savimaa-aineksen sisältämien alumiini- ja piipitoisten potsolaanimineraalien kanssa kaavan (3) mukaisesti.



$Ca(OH)_2$ on	kalsiumhydroksidi
H_2O	vesi
CASH	kalsiumaluminaattisilikaattihydraatti
CSH	kalsiumsilikaattihydraatti

Reaktiossa muodostuu joko kalsiumaluminaattisilikaattihydraattia tai kalsiumsilikaattihydraattia riippuen maan sisältämän aluminaatin määrästä. Sementin ja veden reaktiossa syntynyt lämpö edistää potsolaanireaktiota. (Janz & Johansson, 2002)

Ingles ja Metcalf (1972) esittävät, että maa-aineksen vedenläpäisevyys pienenee sementtistabiloinnin vaikutuksesta, lukuun ottamatta savisia maita, joissa sementin lisäys aiheuttaa vedenläpäisevyyden kasvua. Uudemmissa tutkimuksissa on raportoitu seitsemän päivän vedenläpäisevyyden sementillä stabiloidussa savessa olevan merkittävästi 28 päivän vedenläpäisevyyttä suurempi. Näin esittävät muun muassa Chew ym. (2004), joiden tutkimuksessa havaittiin myös, että seitsemäntenä päivänä mitattu vedenläpäisevyys on 28 päivän vedenläpäisevyyttä herkempi kuormituksen vaihtelulle, kuva 9. Kokeissa käytetyt sementtimäärät olivat 20, 30 ja 50 %. Maa-aineksen luonnontilainen vesipitoisuus oli 70 %. Sementti lisättiin kasteltuun savimassaan ($w = 90$ tai 120 %) veden ja sementin seoksena, jonka vesi-sementtisuhte oli 1,00.



Kuva 9 Sementtipitoisuuden, lujittumisajan ja pystyjännityksen vaikutus saven vedenläpäisevyyteen (Chew ym., 2004)

Åhnberg esittää väitöskirjassaan (2006), että sementillä stabiloitaessa maan vedenläpäisevyys saattaa aluksi kasvaa, koska sementin ja maaperän reaktiossa muodostuva kalsiumhydroksidi osallistuu ioninvaihtoon ja tästä aiheutuu maan kokkaroitumista. Sementtiä käytettäessä kokkaroituminen on kuitenkin melko vähäistä ja maaperän vedenlä-

päisevyys alkaa pienetä reaktiotuotteiden määrän kasvaessa. Sementtistabiloinnissa reaktiotuotteita syntyy nopeasti, koska reaktio tapahtuu suurimmaksi osaksi sideaineen sisältäminen ainesosien kesken. Näin ollen vedenläpäisevyys pienenee nopeasti.

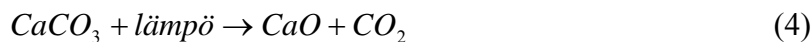
Orgaanista ainesta sisältävässä maassa humushapot hidastavat stabilointia vaikeuttamalla potsolaanireaktiota. Humushapot reagoivat kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen liukenemattomia yhdisteitä, jotka saostuvat partikkelien pinnalle. Ne estävät potsolaanireaktion jatkumisen ja lujuuden kasvun. Myös potsolaanireaktiolle välttämätön korkea pH laskee happojen vaikutuksesta ja lujuudenkehitys hidastuu. (Janz & Johansson, 2002)

Sementtiä käytetään sideaineena paitsi yksinään, myös monien sideaineiden lisänä. Sementtiä käytetään erityisesti kalkin kanssa, mutta sitä lisätään myös aktivaattoriksi teollisuuden sivutuotteita hyödynnetessä.

4.2.2 Kalkki

Kalkkia on käytetty maan stabilointiin jo kymmeniä vuosia – kalkkipilarimenetelmä otettiin käyttöön Ruotsissa 1970-luvun loppupuolella (Åhnberg ym., 1995). Kalkkia käytetään myös pintastabilointiin, sillä vahvistetaan mm. teiden ja rautateiden pohjia (Nordkalk Oyj Abp, 2006). Myös kalkin seoksia sementin, kipsin ja lentotuhkan kanssa käytetään syvästabilointikohteissa (Karlstedt, 1993).

Poltetun kalkin valmistusprosessissa pääosin kalsiumkarbonaatista, CaCO_3 , koostuva murskattu kalkkikivi poltetaan noin 1000 celsiusasteen lämpötilassa. (Nordkalk Oyj Abp, 2006) Kaavan (4) mukaisessa reaktiossa muodostuu kalsiumoksidia ja vapautuu hiilidioksidia. (Janz & Johansson, 2002)



CaCO_3 on	kalsiumkarbonaatti
CaO	kalsiumoksidi
CO_2	hiilidioksidi

Polton jälkeen rakeinen kalkki jauhetaan haluttuun hienousasteeseen. Poltetun kalkin tiheys on 0,9...1,2 t/m³. (Karlstedt, 1993) Taulukossa 2 on esimerkki poltetun kalkin koostumuksesta.

Taulukko 2 Esimerkki poltetun kalkin koostumuksesta (Janz & Johansson, 2002)

Komponentti	CaO-kok	CaO-aktiivinen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Pitoisuus [%]	94	90	1,5	0,8	0,4	1,7	0,1	0,05

Joutuessaan kosketuksiin ilmasta tai maasta peräisin olevan veden kanssa kalsiumoksidi hydratoituu, kaavan (5) mukaan muodostaen kalsiumhydroksidia.



CaO on kalsiumoksidi
H₂O vesi
Ca(OH)₂ kalsiumhydroksidi

Kalsiumoksidin ja veden reaktiossa vapautuu runsaasti lämpöä. Stabiloinnin sideaineena käytetään sekä kalsiumoksidia (poltettu, sammuttamaton kalkki) että kalsiumhydroksidia (sammutettu kalkki). (Janz & Johansson, 2002)

Kun stabiloinnin sideaineena käytetään kalsiumoksidia, CaO, jonka reaktio veden kanssa tuottaa runsaasti lämpöä, maaperä kiinteytyy, koska lämpö haihduttaa vettä (Åhnberg ym., 1995). Maasta poistuu vettä myös, koska reaktiossa vesi sitoutuu kalkkiin. Näin ol-
len reaktio veden kanssa kasvattaa maaperän lujuutta tilapäisesti, koska veden määrä maaperässä vähenee. (Janz & Johansson, 2002) 65 grammaa kalkkia (CaO) sitoo 18 grammaa vettä (Karlstedt, 1993). Kalkin ja veden reaktiossa saavutettu lujuus häviää, kun maaperään tulee lisävettä. Tämä tapahtuu kuitenkin useimmiten niin hitaasti, että maa ehtii stabiloitua muiden reaktioiden vaikutuksesta sillä välin. (Janz & Johansson, 2002) Poltettua kalkkia käytetäänkin maaperän tilapäiseen vahvistamiseen kuivaamalla. (National Lime Association, 2004)

Varsinainen lujuudenkehitys tapahtuu hydratoituneen kalkin ja veden reaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin reagoidessa maaperän aluminaattien ja silikaattien kanssa potsolaanireaktiossa, kaava (3). Potsolaanireaktio on riippuvainen kalkin ja veden reaktiossa

syntyvästä lämmöstä sekä reaktion aiheuttamasta pH:n noususta. (Janz & Johansson, 2002)

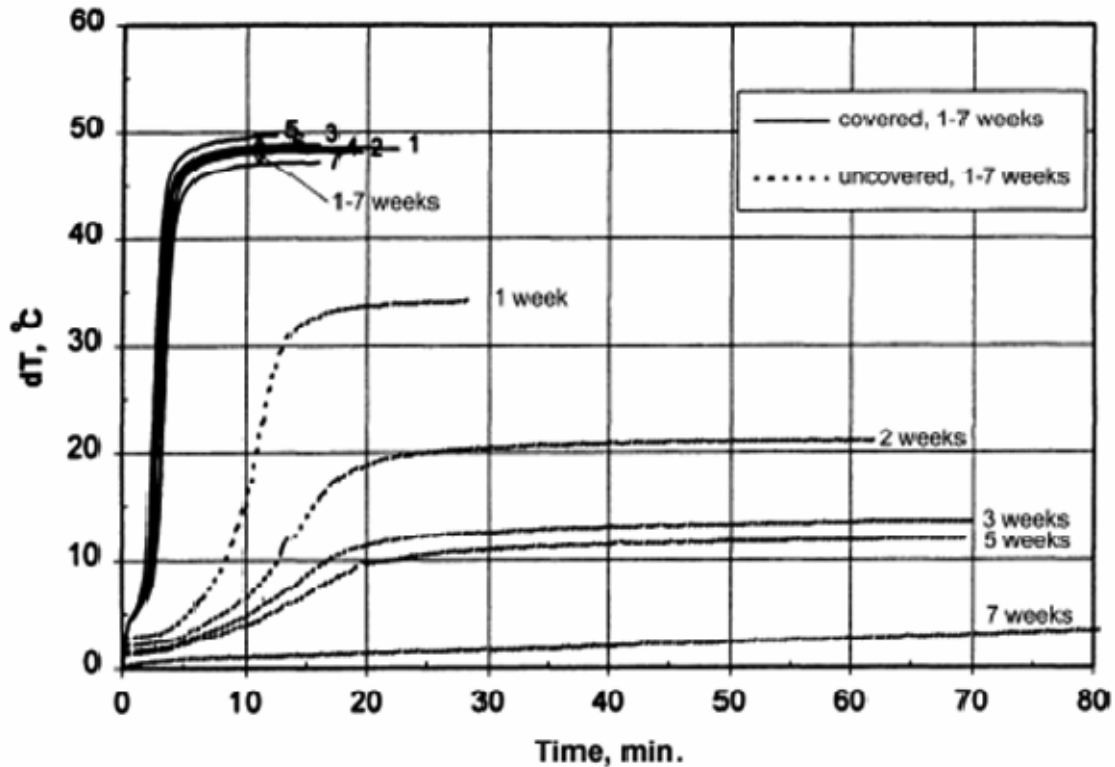
Kun kalkkia sekoitetaan maahan, tapahtuu samanlainen ioninvaihtoreaktio kuin sementillä stabiloitaessa. Åhnbergin (2006) mukaan kalkkia käytettäessä ioninvaihtoreaktio on kuitenkin voimakkaampi, joten reaktiosta seuraava maaperän vedenläpäisevyyden kasvu on suurempi. Kuten sementtistabiloinnissa, myös kalkkistabiloinnissa vedenläpäisevyys alkaa pienetä, kun reaktiotuotteet alkavat täyttää maa huokostilaa. Kalsiumhydroksidi reagoi potsolaanireaktiossa maan aluminaattien ja silikaattien kanssa, ja reaktio on hitaampi kuin sementillä, jonka reaktio tapahtuu lähinnä sideaineen sisältämien komponenttien välillä. Tästä johtuen kalkkistabilointi kasvattaa vedenläpäisevyyttä lyhyellä aikavälillä. Pidemmällä tähtäimellä kalkki- ja sementtistabiloinnin vedenläpäisevyysvaikutuksissa ei tutkimuksessa havaittu juurikaan eroja. Tutkimuksessa käytetty sideainemäärä oli 100 kg/m^3 .

Kalsiumoksidin ja veden reaktio synnyttää niin paljon lämpöä, että on olemassa tulipalovaara. Kalsiumoksidi ärsyttää hengitysteitä ja ihoa. Veden kanssa reagoidessaan kalsiumoksidi muuttuu keskivahvaksi emäkseksi, joten se voi aiheuttaa syövytysvammoja esim. ruoansulatuskanavassa. (Työterveyslaitos, 2006) Kalsiumhydroksidilla, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ei ole haitallisia terveysvaikutuksia, joten työturvallisuudesta on helpompi huolehtia sammutettua kalkkia käytettäessä. Sammutettu, hydratoitunut kalkki lujittaa maaperää ainoastaan potsolaanireaktion kautta – se ei sido vettä tai tuota lämpöä (Janz & Johansson, 2002).

Maa-aineksen humuspitoisuudella on suurempi negatiivinen vaikutus kalkkistabilointiin kuin sementtistabilointiin, koska kalkkia käytettäessä lujuus kehittyy pelkästään potsolaanireaktion seurauksena ja humushapot vaikuttavat juuri potsolaanireaktiota vaimentavasti. Orgaanista ainesta sisältävän maan stabiloinnissa sementti toimii kalkkia paremmin. (Åhnberg ym., 1995; Janz & Johansson, 2002)

Poltetun kalkin varastoinnissa on pidettävä huolta, että materiaali on huolella suojattu ilman kosteudelta. Kosteus aiheuttaa kalkin hydratoitumista eli sammumista, jonka jälkeen

kalkki reagoi vielä ilman hiilidioksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia. Poltetun kalkin reaktiivisuus laskee suojaamattomassa säilytyksessä jo viikon aikana merkittävästi, kuva 10. (Janz & Johansson, 2002)



Kuva 10 Säilytystavan vaikutus hydrataatiolämmön kehitykseen kosteudelta suojatuille (covered) ja suojaamattomille (uncovered) näytteille (Janz & Johansson, 2002)

4.2.3 Tuhkat

Kivihiilen lentotuhka

Kivihiilen poltossa palamattomat alkuaineet sitoutuvat tuhkaan: karkeampi aines pohjatuhkaan ja kevyempi lentotuhkaan. Lentotuhka erotetaan suotimilla muusta kaasuvirrasta. Tuhkan koostumus riippuu vahvasti poltetun hiilen koostumuksesta, palamisolosuhteista ja savukaasujen puhdistustekniikasta. (Mäkelä ym., 1998) Myös tuhkan potsolaaniset ominaisuudet vaihtelevat suuresti eri laitosten välillä. Jos hiilen poltossa käytetään korkeaa lämpötilaa ja nopeaa jäähdytystä, tuhkan stabilointiominaisuudet ovat hyvät. (Janz & Johansson, 2002) Tuhkaa syntyy noin 10...15 prosenttia poltettavan kivihiilen alkuperäi-

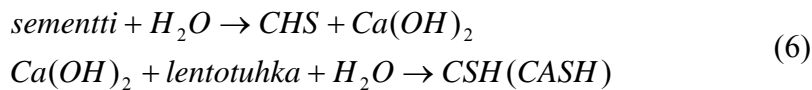
sestä painosta. Lentotuhkaa on hyödynnetty maarakennusmateriaalina Suomessa 60-luvulta lähtien mm. stabiloinnin sideaineiden ainesosana. (Mäkelä & Höynälä, 2000)

Taulukossa 3 on esimerkki kivihiililentotuhkan koostumuksen vaihteluväleistä. Taulukossa esitettyjen yhdisteiden lisäksi lentotuhka sisältää pienempiä määriä kymmeniä eri aineita, myös raskasmetalleja. (Mäkelä ym., 1998)

Taulukko 3 Esimerkki kivihiililentotuhkan koostumuksesta (Mäkelä et al, 2000, Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa)

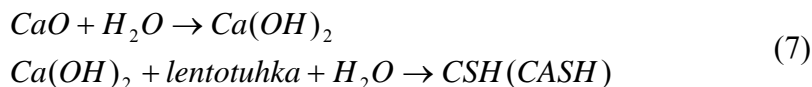
Kemiallinen yhdiste	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Pitoisuus [%]	45-55	20-30	8-11	4-7	3-5	1-2	0-2

Sideaineen hydraulisuus riippuu kalkki-piidioksidisuhteesta, CaO/SiO₂. Jos suhde on korkea, kuten sementillä, aine reagoi veden kanssa. Lentotuhkan piidioksidipitoisuus, SiO₂, on korkea, mutta kalkkipitoisuus matala. Lentotuhka on potsolaaninen materiaali, joka vaatii lujittuakseen kalkkilisäyksen. (Janz & Johansson, 2002) Aktivaattorina voidaan käyttää esimerkiksi sementtiä, kalkkia tai rikinpoiston lopputuotetta. (Mäkelä & Höynälä, 2000) Sementtiä lentotuhkan aktivaattorina käytettäessä reaktiot ovat kaavojen (6) ja (7) mukaiset. Reaktiotuotteena muodostuu kalsiumsilikaattihydraattigeeliä tai kalsiumaluminaattisilikaattihydraattia. (Janz & Johansson, 2002)



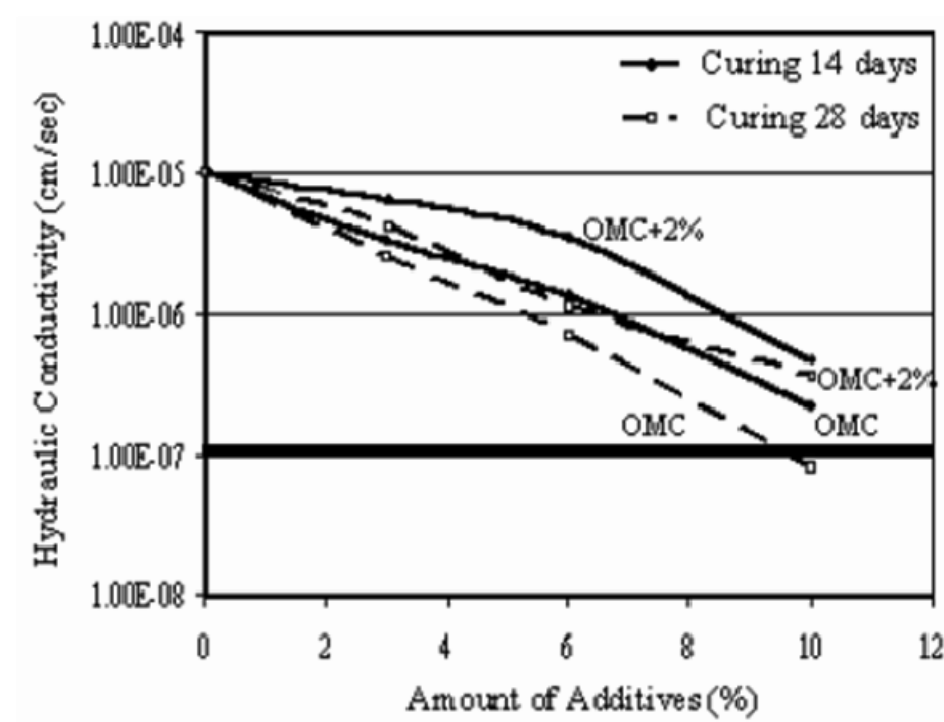
H₂O on vesi
 CHS kalsiumsilikaattihydraatti
 Ca(OH)₂ kalsiumhydroksidi
 CASH kalsiumaluminaattisilikaattihydraatti

Kalkkia, CaO, käytettäessä kaavojen (7) mukaiset.



CaO on kalsiumoksidi, muut kuten kaavassa (6)

Thaimaalaisessa tutkimuksessa (Jirathanathaworn ym., 2004) stabiloitiin savista hiekkaa kalkin ja lentotuhkan seoksella (1:20). Tavoitteena oli selvittää, voidaanko savisen hiekan ominaisuuksia parantaa stabiloinnin avulla, jotta maamateriaalia olisi mahdollista käyttää esimerkiksi kaatopaikan tiivistysrakenteena. Tutkimuksessa keskityttiin lujuuden parantamiseen ja vedenläpäisevyyden pienentämiseen. Stabiloimattoman savisen hiekan vedenläpäisevyys oli $1,13 \times 10^{-7} \dots 9,75 \times 10^{-8}$ m/s. Kalkki-lentotuhkastabiloinnin havaittiin pienentävän maan vedenläpäisevyyttä: kymmenen prosentin sideainelisäyksellä vedenläpäisevyydeksi optimivesipitoisuudessa tiivistetyille näytteille saatiin $5,67 \times 10^{-9} \dots 9,27 \times 10^{-10}$ m/s. Vedenläpäisevyys muodostui suuremmaksi, jos vesipitoisuus ylitti optimin. Maan lujuus kasvoi sideainemäärän kasvaessa ja lujittumisajan pidentyessä. Vedenläpäisevyys pieneni sideainemäärän kasvaessa. Myös lujittumisajalla oli vedenläpäisevyyttä pienentävä vaikutus. Kokeissa testattiin 14 ja 28 päivän ikäisiä näytteitä. Kuvassa 11 esitetään vedenläpäisevyys (cm/s) sideainemäärän funktiona.



Kuva 11 Vedenläpäisevyys eri sideainemäärillä optimivesipitoisuudessa (OMC) ja kosteampana (OMC+2 %), lujittumisaika 14 tai 28 vuorokautta. (Jirathanathaworn ym., 2004)

Potsolaanisten materiaalien reaktiivisuus riippuu niiden hienousasteesta (ominaispinta-alasta) ja lasimaisuudesta. Mitä lasimaisempaa tuhka on, sitä helpommin se reagoi. Lentotuhkan ominaispinta-ala on 300...500 m²/kg. (Janz & Johansson, 2002)

Jos siltti- ja savimaihin lisätään potsolaanisia sideaineita, reaktio kuluttaa saatavilla olevan kalsiumhydroksidin, jolloin maaperän omat potsolaaniset yhdisteet eivät tule hyödynnetyiksi. Seurauksena reaktiotuotteiden määrä jää vähäisemmäksi. Tämän vuoksi potsolaanisten tai piilohydraulisten (esim. masuunikuonajauhe) materiaalien lisääminen savi- ja silttimaihin on usein tarpeetonta. (Janz & Johansson, 2002)

Kivihiilen pohjatuhka ei ole lujittuva materiaali. Pohjatuhkaa käytetään esim. tierakenteiden suodatinkerroksissa sekä pengeri- ja taustatäytöissä. Kivihiilituhkien sisältämät raskasmetallit aiheuttavat rajoituksia tuhkien ympäristökelpoisuuteen. (Mäkelä & Höynälä, 2000)

Turvetuhka

Kuten kivihiililentotuhkan, myös turvetuhkan koostumus vaihtelee suuresti eri voimalaitosten välillä riippuen laitoksella käytetyn turpeen laadusta, suotyypistä, nostosyvyydestä, pohjaveden laadusta ja mahdollisesta apupolttoaineesta. Tuhkaa muodostuu 3...10 % poltettavan turpeen kuivapainosta. Koska turvevoimalaitoksissa käytetään yleisimmin pölypolttoa, syntyvä tuhka on suurimmaksi osaksi lentotuhkaa. Turvetuhkaa käytetään rakentamisessa kivihiililentotuhkan tapaan. (Mäkelä & Höynälä, 2000) Esimerkki turvetuhkan koostumusvaihteluista on taulukossa 4.

Taulukko 4 Eri laitosten turvetuhkien koostumuksen vaihteluvälit (Mäkelä & Höynälä, 2000)

Kemiallinen yhdiste	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₂
Pitoisuus [%]	3,1-57	2,5-29	0-36	5-30	1-25	0,3-7	5-20

Turvetuhkien lujittuvuuksissa on eroja. Sementti- tai kalkkiaktivaattoria tarvitaan joskus turvetuhkan lujittamiseksi. (Mäkelä & Höynälä, 2000) Taulukoita 4 ja 3 vertaamalla nähdään, että turvetuhkan CaO/SiO₂-suhde on suurempi kuin kivihiilen tukalla.

Turvetuhka on radioaktiivista. Radioaktiivisuus vaihtelee maan eri osissa. Tuhka sisältää myös raskasmetalleja. (Mäkelä & Höynälä, 2000) Turvetuhkalle tehty liukoisuuskokeet osoittavat, että tuhkan puskurikapasiteetti säilyy kauan. Myös pH pysyy lähes vakiona. Tuhkan sisältämät metallit eivät liukene suurissa määrin emäksisissä olosuhteissa. Tuloksissa esiintyy kuitenkin suurta vaihtelua eri laitoksista peräisin olevien tuhkien välillä. (Helenius ym., 1992)

Muita tuhkia

Maailmalla on kokeiltu erilaisten orgaanisten jätteiden poltossa syntyviä tuhkia maan stabiloinnin sideaineina. Jätteiden hyötykäytöllä pyritään poistamaan jätteiden sijoituksesta aiheutuvia ongelmia ja vähentämään luonnonmaa-aineksien käyttöä.

Attomin ja Al-Shariffin artikkeli (1998) esittelee jordanialaisen tutkimuksen, jossa selvitettiin poltetun oliivijätteen käyttöä maan stabiloinnissa. Tulokseksi saatiin, että kun maa-ainekseen lisätään 2,5 painoprosenttia oliivijätetuhkaa maksimikuivatilavuuspaino ja yksiaksiaalinen puristuslujuus kasvavat. Suuremmilla tuhkalisäyksillä edellä mainitut ominaisuudet pienenevät. Tuhkan vaikutusta vedenläpäisevyyteen ei testattu.

Oliivituhka on potsolaaninen materiaali. Tuhkan sisältämä kalsiumoksidi, CaO, reagoi veden kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia, Ca(OH)₂. Kalsiumhydroksidi reagoi tuhkan ja saven sisältämän piidioksidin kanssa kaavan (3) mukaisessa potsolaanireaktiossa, joka johtaa maan lujuuden kasvuun. (Attom & Al-Sharif, 1998)

Malesialais-indonesialaisessa tutkimuksessa (Basha ym., 2005) testattiin poltetun riisinkuorijätteen soveltuvuutta maaperän stabilointiin. Taulukkoon 5 on koottu tutkitun riisinkuorijätetuhkan pääkomponentit. Taulukosta nähdään, että riisinkuorituhkan CaO-pitoisuus on hyvin pieni; esim. turvetuhkan CaO/SiO₂-suhde on merkittävästi suurempi.

Taulukko 5 Riisinkuorijätetuhkan pääkomponentit (Basha ym., 2005)

Kemiallinen yhdiste	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO
Pitoisuus [%]	93,15	0,21	0,21	0,41	22,31	0,45

Tutkimuksessa riisinkuorituhkaan lisättiin aktivaattoriksi sementtiä. Havaittiin, että parhaat stabilointitulokset saavutetaan lisäämällä maa-ainekseen 6...8 % sementtiä ja 15...20 % riisinkuorituhkaa. Tällöin plastisuus vähenee, lujuus kasvaa ja kastumiskuivumiskestävyys paranee. Tässäkään tutkimuksessa ei selvitetty sideaineen vaikutusta maa-aineksen vedenläpäisevyyteen. Tutkimuksessa havaittiin, että käyttämällä riisinkuorituhkaa voidaan vähentää tarvittavan sementin määrää ja säästää rakennuskustannuksissa. (Basha ym., 2005)

Myös yhdyskuntajätteen tuhkaa on kokeiltu maan stabiloinnissa. Goh ja Tay (1993) raportoivat tutkimuksesta, jossa testattiin yhdyskuntajätetuhkan soveltuvuutta singaporelaisen mereen kerrostuneen saven stabilointiin. Tutkimuksessa käytetty tuhka oli peräisin yhdyskuntajätettä polttavalta jätteenpolttolaitokselta.

Tuhkan pääkomponentit olivat silikaatti, kalsium ja alumiini. Tuhkasta löytyy jonkin verran myös rautaa, kaliumia ja natriumia. Lisäksi havaittiin pieniä määriä raskasmetalleja, mm. sinkkiä ja lyijyä. 90 päivän liukoisuustestissä pH nousi aluksi tasolle 9,4, mutta laski 28 päivän kohdalla käytetyn veden pH:n tasolle, 7,2. Suotoveden mukana liukenivat helpoiten kalsium, natrium ja kalium. Lisäksi kromin ja kadmiumin pitoisuudet ylittivät koheen alkuvaiheessa WHO:n vuoden 1984 rajoitukset (Cr 0,05 mg/l ja Cd 0,005 mg/l). 28 päivän kohdalla myrkyllisten kemikaalien pitoisuudet olivat jo laskeneet WHO:n rajojen alapuolelle. (Goh & Tay, 1993)

Tutkimuksessa savea stabiloitiin yhdyskuntajätetuhkalla sekä tuhka-sementti- ja tuhka-kalkkiseoksella. Stabiloinnilla havaittiin olevan edullinen vaikutus maan työstettävyyteen. Kokeissa havaittiin stabiloidun maan suljetun leikkauslujuuden kasvavan sekä koonpuristuvuuden ja plastisuusindeksin pienenevän. Tehokkaimmin toimi sementin ja tuhkan yhdistelmä (50/50). Stabiloimattoman saven vedenläpäisevyys oli $5,8 \times 10^{-11}$ m/s. Stabiloidun saven vedenläpäisevyys oli kolme kertaluokkaa suurempi, mutta pieneni lujuuttumisen myötä. Suotoveden sisältämä kemikaalimäärä sementti- tai kalkkistabiloidussa tuhassa pieneni stabiloimattomaan tuhkaan verrattuna. (Goh & Tay, 1993)

Nordkalkin ja Statens geotekniska institutin (SGI) laatimassa raportissa (2006) kerrotaan kierrätyspaperin puhdistuksessa syntyvän, paperinvalmistuksessa käyttökelvottoman lietteen polttotuhkan käytöstä sementin ja kalkin lisäaineena saven stabiloinnissa. Tuhkalla, joka sisältää 30 % aktiivista kalsiumoksidia, on potsolaaniset ominaisuudet. Aktivaattoriksi tarvitaan kalkkia tai sementtiä.

Tutkimuksessa selvitettiin erilaisilla seoksilla stabiloidun saven lujuuskehitystä sekä ympäristöominaisuuksia. Lietetuhkalla havaittiin olevan stabiloiva vaikutus. Kun kalkki-sementtiseoksessa (50/50) 7 % kalkista korvattiin tuhkalla, saavutettiin jopa hieman korkeampi lujuus kuin kalkilla ja sementillä. Suuremmilla tuhkaosuuksilla ensimmäisten viikkojen lujuudet jäivät pienemmiksi kuin kalkilla ja sementillä, mutta lujuudet kasvoivat pidemmällä aikavälillä jopa suuremmiksi, kun sideainetta käytettiin 80...90 kg/m³. Ravistelu- ja kolonnikokeissa havaittiin kalkki-sementti-tuhkaseoksen liukoisuusominaisuuksien olevan kalkki-sementtiseoksen kaltaiset. (Rogbeck ym., 2006)

4.2.4 Masuunikuona

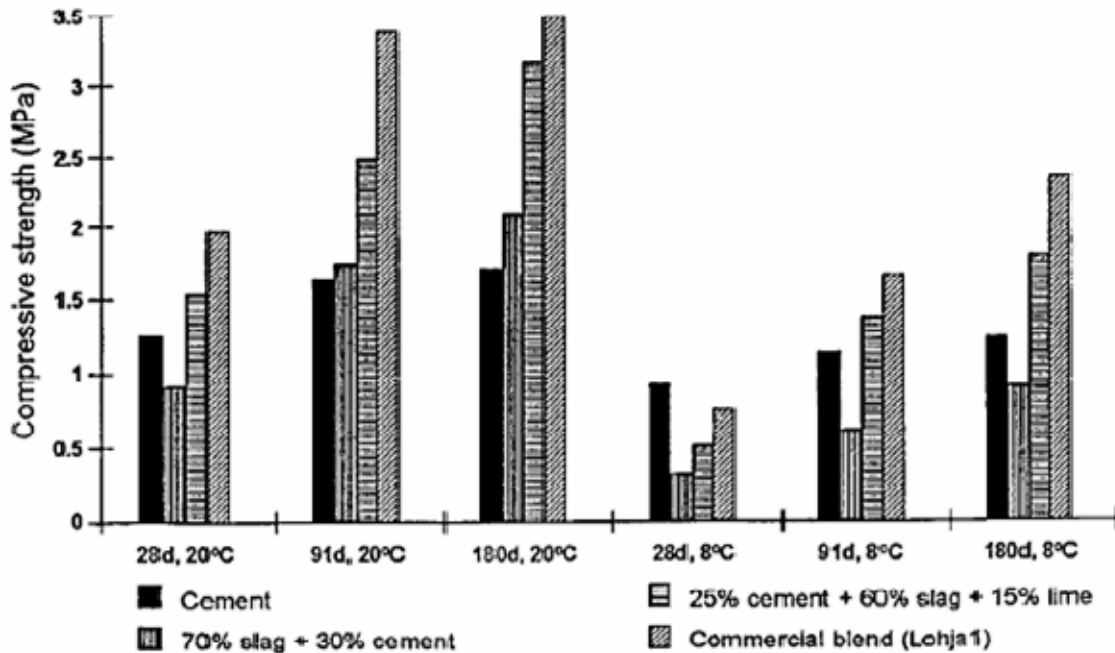
Masuunikuona syntyy raakaraudan valmistuksen sivutuotteena. Masuunihiekkaa saadaan vesijäähdytyksen tuloksena, eli granuloidulla kuona paineellisella vesisuihkulla. Masuunihiekan raekoko on 0...5 millimetriä ja lasimaisuusaste 98...100 %. Masuunihiekan rakeet ovat terävasärmäisiä, joten materiaali tiivistyy hyvin. Stabiloinnin sideaineena käytetään jauhattua masuunihiekkaa. (Mäkelä & Höynälä, 2000) Masuunihiekkajauheen ominaispinta-ala on yleensä sementin ominaispinta-alan luokkaa, 300...500 m²/kg. (Janz & Johansson, 2002)

Masuunihiekalla on piilevät hydrauliset ominaisuudet. (Janz & Johansson, 2002; Rekonen, 1993) Taulukossa 6 on esimerkki masuunihiekan koostumuksesta. Taulukosta nähdään, että CaO/SiO₂-suhde masuunihiekalle on yleensä noin yksi. Masuunihiekka aktiivoidaan stabilointiin soveltuvaksi joko kalkilla tai sementillä. Kalkki ja sementti myös nostavat stabiloitavan maan lämpötilaa ja siten vauhdittavat masuunikuonan reaktiota. (Janz & Johansson, 2002)

Taulukko 6 Esimerkki masuunihiekan koostumuksesta (Janz & Johansson, 2002)

Mineraali	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	S	FeO	Na ₂ O	K ₂ O
Pitoisuus [%]	36	36	10	13	1	0,4	0,4	0,6

Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa tehdyssä tutkimuksessa selvitettiin mm. jauhetun masuunihiekan ja sementin seoksen savea lujittavaa vaikutusta. Käytetyn saven vesipitoisuus oli 99,4 % ja se sisälsi 2,5 % humusta. Seoksilla, jotka sisälsivät kuonajauhetta ja sementtiä (70 %/30 %) sekä sementtiä, kuonajauhetta ja kalkkia (25 %/60 %/15 %) saavutettiin pitkällä aikavälillä 20 celsiusasteessa korkeampi lujuus, kuin käyttämällä sideaineena pelkkää sementtiä, kuva 12. Sivutuotetta sisältävien sideaineiden aikaansaama lujittuminen on hitaampaa kuin sementtisineaineen. (Kukko, 2000)



Kuva 12 Saven lujittuminen erilaisilla sideaineilla 20 ja 8 °C:n lämpötiloissa (Kukko, 2000)

Helsingin kaupungin Viikin savikatu -hankkeessa testattiin mm. sementillä aktivoidun masuunikuonajauheen soveltuvuutta katurakenteen tukikerrokseen. Stabiloitu materiaali oli lihavaa savea, jonka vesipitoisuuden keskiarvo oli 71 %. Vedenläpäisevyytestit tehtiin kolmiaksiaalilaitteistolla masuunikuonajauhe-sementtiseokselle (70:30), jota käytettiin 6 ja 14 % maa-aineksen märkäpainosta. Stabiloitujen koekappaleiden vedenläpäisevyydet olivat $3,5 \times 10^{-9}$ m/s, kun sideainetta käytettiin 6 % ja $3,5 \times 10^{-11}$ m/s si-

deainemäärän ollessa 14 %. Jälkimmäinen arvo on vertailuryhmän pienin, esim. sementtikalkkiseoksella (95:5) 14 prosentin pitoisuudella vedenläpäisevyys oli $2,1 \times 10^{-10}$ m/s. (Mäkelä ym., 2000a)

Myös Helen Åhnberg kirjoittaa väitöskirjassaan (2006) kuona-sementtiseoksen aikaansaaman pitkäaikaislujuuden normaalisti olevan suurempi, kuin pelkällä sementtistabiloinnilla saavutetaan.

4.2.5 Rikinpoiston lopputuote

Kivihiilen savukaasujen sisältämä rikki poistetaan rikinpoistoprosessissa. Tuloksena syntyy rikinpoiston lopputuotetta. Lopputuotteen koostumus vaihtelee poltetun hiilen ja käytetyn kalkin koostumuksen mukaan. Myös poltto- ja rikinpoistoprosessien säädöt vaikuttavat lopputuotteen koostumukseen. (Karlstedt, 1993) Rikinpoiston lopputuote ei ole lujuuttuva materiaali itsessään. Sitä käytetään stabiloinnin sideaineiden ainesosana, esimerkiksi lentotuhkan aktivaattorina. (Mäkelä & Höynälä, 2000)

Rikinpoistoon käytetään Suomessa yleisimmin puolikuivaa menetelmää. Menetelmässä rikkiä sitova aine kostutetaan vedellä ja injektoidaan savukaasun sekaan. Sitovana aineena käytetään esimerkiksi kalsiumoksidia. Suomessa on käytössä myös kuivamenetelmä, jossa rikkiä sitovaa ainetta ei kostuteta. (Mäkelä & Höynälä, 2000)

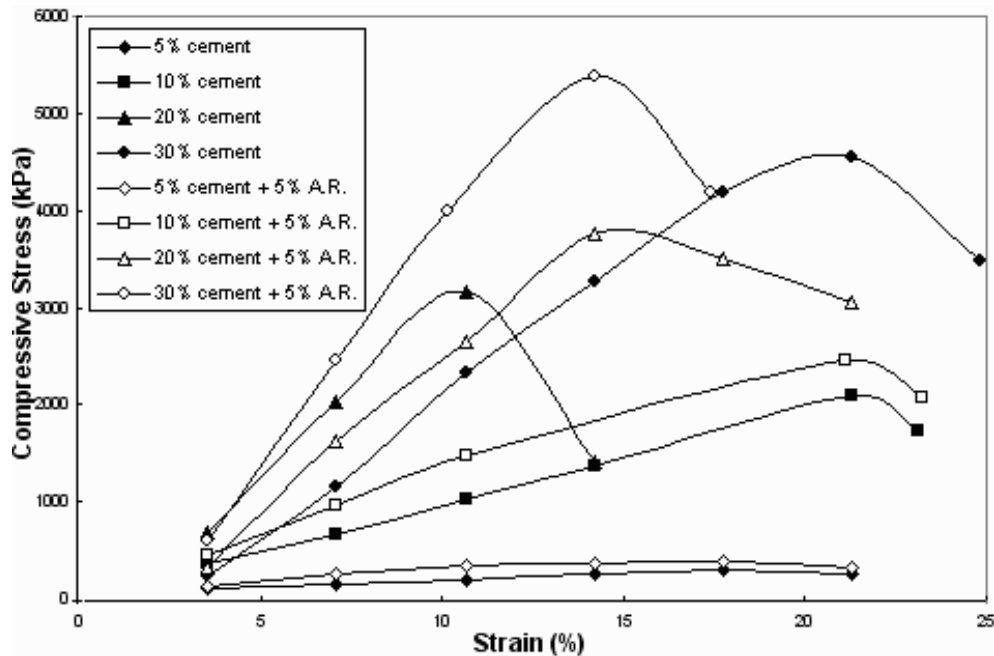
Puolikuivan menetelmän rikinpoiston lopputuote sisältää kaliumsulfaattia, kaliumsulfidia, kalsiumhydroksidia, kalsiumkarbonaattia ja kalsiumkloridia sekä lentotuhkaa. Lopputuote sisältää myös pieniä määriä muita aineita, kuten raskasmetalleja. Lopputuotteen sisältämät kloridit ja sulfaatit rajoittavat materiaalin käyttöä maarakentamisessa. (Mäkelä & Höynälä, 2000; Karlstedt, 1993) Rikinpoistotuotteen osuudeksi maarakenteissa suositellaankin 10...20 % massan kuiva-ainepitoisuudesta. (Mäkelä ym., 1998)

4.2.6 Muita stabiloinnissa käytettyjä side- ja lisäaineita

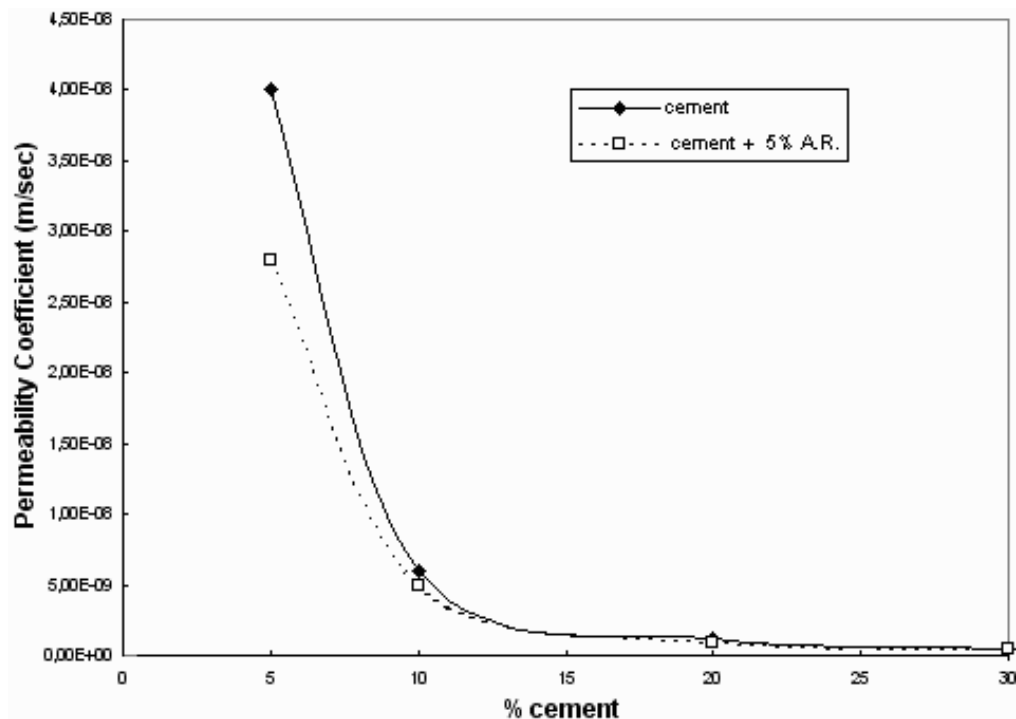
Akryylihartsin käyttöä stabiloinnissa sementin lisäaineena kokeiltiin kreikkalaistutkimuksessa (Anagnostopoulos & Stavridakis, 2003). Stabiloitavat maanäytteet sisälsivät 27 % savea, 40 % silttiä ja 33 % hiekkaa. Näytteiden vesipitoisuus oli 25,16 %.

Tutkimusta varten valmistettiin kahdet näytteet: sementtiä (5, 10, 20 ja 30 % maan painosta) ja akryylihartsia (5 % sementin painosta) sisältävät näytteet sekä pelkästään sementtiä (5, 10, 20 ja 30 %) sisältävät näytteet. Kokeet tehtiin seitsemän ja 28 päivän ikäisille näytteille.

Seitsemäntenä päivänä tehdyissä yksiaksisiaalisissa puristuskokeissa lujuus oli pienempi näytteillä, joihin oli lisätty akryylihartsia. Kuitenkin 28 päivän kokeissa sementti-akryylihartsistabiloidut näytteet saavuttivat sementillä stabiloituja näytteitä suuremmat lujuudet, kuva 13. Sementtipitoisuuden kasvaessa viidestä kymmeneen prosenttiin vedenläpäisevyys pieneni noin kymmenesosaan, kuva 14. Akryylihartsin lisääminen vähensi vedenläpäisevyyttä hieman.



Kuva 13 Jännitys-muodonmuutuskäyttäytyminen sementillä tai sementti-akryylihartsiseoksella stabiloiduissa maanäytteissä 28 päivän lujittumisen jälkeen (Anagnostopoulos & Stavridakis, 2003)



Kuva 14 Sementin ja akryylihartsin vaikutus vedenläpäisevyyteen 28 päivän ikäisillä näytteillä (Anagnostopoulos & Stavridakis, 2003)

Kipsiä syntyy lannoiteteollisuudessa ja energiantuotannossa jätteenä ja sivutuotteena (Viljas, 1996). Lannoiteteollisuuden tuottama jättekipsi on dihydraattimuotoista, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Dihydraattikipsin reagoi vedessä ja savimineraalien kanssa muodostuu ettringiittiä, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$. (Karlstedt, 1993) Neulasmainen ettringiitti täyttää savipartikkelien väliset huokokset. (Janz & Johansson, 2002) Ettringiitti tuhoutuu pH:n laskiessa alle kymmenen sekä lämpötilan noustessa 60 celsiusasteeseen kuivassa faasissa. Tällaiset olosuhteet ovat kuitenkin poikkeuksellisia maan stabiloinnissa. Lisäksi, mikäli maa-aines on jo ehtinyt sitoutua muodostaen kalsiumsilikaattihydraatteja, vaikutus lujuuteen lienee vähäinen. (Viljas, 1996)

Kipsiä on käytetty Suomessa ja Ruotsissa esimerkiksi humuspitoisen maaperän stabilointiin yhdessä kalkin kanssa (Hautala, 1981; Holm ym., 1987) sekä supersulfaattisementin valmistukseen (Viljas, 1996). Holm ryhmineen (1987) raportoi kipsin ja kalkin laboratoriokeissa tuottavan nopeamman lujuuden kasvun alkuvaiheessa pelkkään kalkkistabilointiin verrattuna. Kenttäkokeissa sideaineet saivat aikaan suunnilleen saman lujuuden.

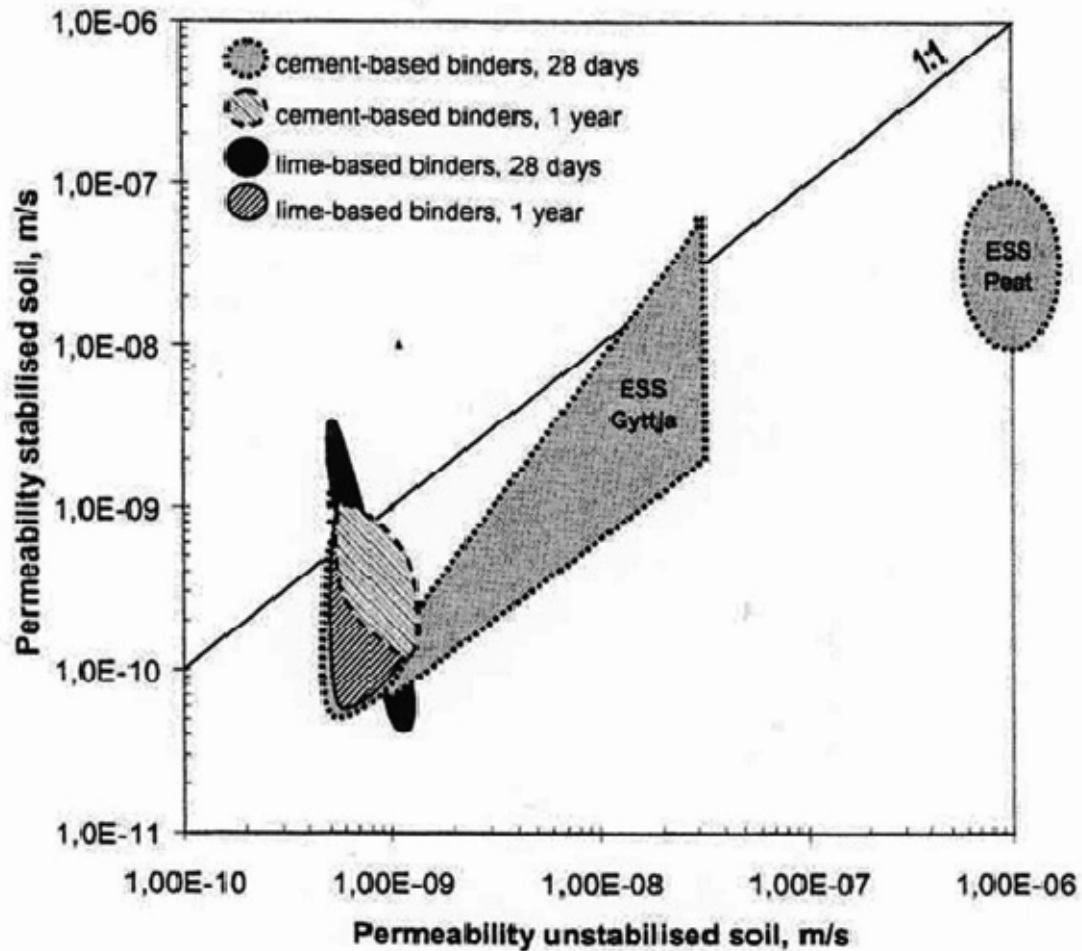
4.3 Stabiloinnin vaikutus vedenläpäisevyyteen – yhteenveto

Åhnbergin (2006) ja Chew'n ryhmän (2004) tuloksista käy ilmi, että vedenläpäisevyys riippuu sementti- ja kalkkipohjaisilla sideaineilla stabiloitaessa sekä sideainemäärästä, lujittumisajasta että maamassaan kohdistuneesta pystyjännityksestä.

Chew'n ryhmän kokeessa vedenläpäisevyys kasvoi varsinkin lujittumisen alkuvaiheessa luonnontilaiseen maahan verrattuna. Tämä saattaa johtua siitä, että tutkimuksissa maanäytteisiin, joiden luonnollinen vesipitoisuus oli 70 %, lisättiin vettä siten, että vesipitoisuudeksi tuli 90 tai 120 %. Lisäksi stabilointiin käytettiin veden ja sementin seosta, seossuhteella 1,00. Käytetyt sideainemäärät olivat 20, 30 ja 50 %. Veden lisäyksen johdosta massan vesi-sementtisuhde muodostui suureksi, eikä reaktiossa syntyvä lujittava ja vedenläpäisevyyttä pienentävä massa täyttänyt huokosia yhtä tehokkaasti kuin olisi tapahtunut pienemmällä vesimäärällä.

Åhnberg esittää heti stabilointiaineen sekoittamisen jälkeen havaitun vedenläpäisevyyden kasvun johtuvan sideaineiden sisältämän kalsiumhydroksidin osallistumisesta ioninvaihtoon maaperässä, mikä aiheuttaa maan kokkaroitumista. Tämä reaktio on erityisen voimakas kalkilla.

Åhnbergin mukaan eri sideaineilla stabiloidun maan vedenläpäisevyyden pieneneminen voidaan liittää maan lujuuden kasvuun. Pitkällä aikavälillä tutkimuksessa ei havaittu eroja eri sideaineiden ja sideaineseosten vedenläpäisevyysvaikutuksilla, kuva 15, tosin kalkkipohjaisilla sideaineilla stabiloitujen näytteiden vedenläpäisevyyksien hajonta oli suurempaa kuin sementtipohjaisilla sideaineilla stabiloitujen näytteiden. Kokeissa käytetty sideainemäärä oli 100 kg/m^3 , joissakin tapauksissa myös 50 tai 150 kg/m^3 . Sideainemäärän vaikutus on huomioitava: Åhnberg viittaa tutkimuksiin, joissa vasta viiden prosentin kalkkilisäyksellä saavutetaan stabiloimatonta maata pienempi vedenläpäisevyys.



Kuva 15 Vedenläpäisevyyksien hajonta-alueet stabiloidussa vs. stabiloimattomassa maassa. ESS viittaa EuroSoilStab-projektissa stabiloituihin lieju- ja turvenäytteisiin. (Åhnberg, 2006)

Anagnostopoulos ja Stavridakis (2003) tekivät kokeita eri sementtimäärillä ja käyttäen akryylihartsia sementin lisäaineena. Tutkimuksissa havaittiin sideainemäärän lisäyksen pienentävän vedenläpäisevyyttä. Kokeissa käytettiin sementtipitoisuuksia 5, 10, 20 ja 30 % maa-aineksen painosta. Tuloksia ei voida verrata Åhnbergin teoriaan ioninvaihdon vedenläpäisevyyttä lisäävästä vaikutuksesta, koska artikkelissa ei esitetä luonnontilaisen maan vedenläpäisevyyttä. Lisäksi artikkelissa kuvataan ainoastaan 28 päivän vedenläpäisevyydet, joten ei nähdä, miten vedenläpäisevyys on muuttunut lujittumisen myötä. Joka tapauksessa suuremman sementtimäärän aikaansaaman lujuuden kasvun ja pienenevän vedenläpäisevyyden yhteys on nähtävissä myös Anagnostopouloksen ryhmän tutkimuksessa.

Väitöskirjassaan (2006) Åhnberg esittää kaavan (8), jonka avulla voidaan likimain arvioida stabiloidun maan vedenläpäisevyys.

$$\frac{k_{stab}}{k} \approx 0,043 \cdot e^{\frac{6w_s}{w} - 0,004q_{uc}}. \quad (8)$$

k_{stab}	on	stabiloidun maan vedenläpäisevyyskerroin, m/s
k		luonnontilaisen maan vedenläpäisevyyskerroin, m/s
w_s		stabiloidun maan vesipitoisuus, %
w		luonnontilaisen maan vesipitoisuus, %
q_{uc}		stabiloidun maan yksiaksiaalinen puristuslujuus, kPa

Lisäksi väitöskirjassa esitetään karkea arvio, jonka mukaan vedenläpäisevyys pienenee kymmenesosaan, aina kun lujuus kasvaa 600 kPa.

Perinteisesti käytetyillä sideaineilla, kalkilla ja sementillä, stabiloitaessa vedenläpäisevyys yleisesti pienenee pitkällä aikavälillä reaktiotuotteiden määrän lisääntyessä ja lujuuden kasvaessa. Tässä luvussa esitetyissä tutkimuksissa käytetyillä sideainemäärillä stabiloidun maan vedenläpäisevyys on pienempi kuin stabiloimattoman. Sama pätee myös tässä luvussa käsiteltyihin kalkista ja sementistä erilaisten teollisuuden sivutuotteiden kanssa tehtyihin seoksiin, esim. kalkki-lentotuhka- ja masuunikuona-sementtiseoksiin. Vedenläpäisevyys pienenee sitä nopeammin mitä nopeammin stabiloinnin reaktiotuotteita syntyy. Stabiloidun maan vedenläpäisevyyteen vaikuttavat kuitenkin myös lujittumisen aikana mahdollisesti syntyvät mikrohalkeamat ja koekappaleisiin jääneet ilmataskut, jotka voivat lisätä vedenläpäisevyyttä.

5 Massastabiloidun saven käyttö rakennuskohteissa

5.1 Käytön edellytyksiä

5.1.1 Laatuvaatimukset

Rakennusaineena käytettävälle savimassalle ja valmiille savirakenteille asetetaan tiettyjä vaatimuksia. Vaatimukset voivat liittyä esimerkiksi savimassan työstettävyyteen tai rakenteen laatuun ja toimivuuteen. Jotkin vaatimukset, esimerkiksi kaatopaikkojen tiivistysrakenteiden osalta, on määritelty valtioneuvoston päätöksissä, toiset liittyvät hyvään rakennustapaan ja ovat luonteeltaan suosituksia.

Esimerkiksi kaatopaikkojen tai pilaantuneiden maiden sijoituspaikkojen tiivistysrakenteissa käytettävän savimateriaalin tulee täyttää vedenläpäisevyys ehdot ja lisäksi olla riittävän kantavaa, jotta työstäminen onnistuu. Yleensä mikään pohjamaatyyppejä ei ilman lisäaineita täytä molempia edellä annettuja vaatimuksia (Forsman, 1998).

5.1.2 Tiivistettävyyden, lujuuden, työstettävyyden

Tie- ja vesirakennushallituksen julkaisemassa kirjassa Kuivakuorisavien ja silttien käyttö tiepenkereissä (Tie- ja vesirakennushallitus, 1986) käsitellään muun muassa saven tiivistymisen edellytyksiä ja tiivistyskalustoa. Teoksessa mainitaan hienorakeisten maalajien tiivistyvyyteen vaikuttaviksi tekijöiksi erityisesti maan vesipitoisuus sekä maarakeiden väliset koheesiovoimat. Savimaalajien optimivesipitoisuuden kerrotaan olevan niiden plastisella vesipitoisuusalueella, yleensä noin 15...25 % (Tie- ja vesirakennushallitus, 1968; Forsman, 1998). Kaatopaikkojen mineraalisessa tiivistyskerroksessa käytettävällä materiaalilla tulee olla plastisia ominaisuuksia, koska tiivisteen tulee kestää pohjamaan ja jätetäytön painumien aiheuttamat muodonmuutokset. (Suomen ympäristökeskus, 2002)

Kun saven vesipitoisuus ylittää kieritysrajan, maa-aineksen tiivistäminen on tehokkaampaa, koska materiaali muuttuu plastiseksi koheesion ja leikkauslujuuden pienentyessä.

Vesipitoisuuden noustessa kohti juoksurajaa tiivistäminen vaikeutuu jälleen. Pienen vedenläpäisevyyden vuoksi vesi poistuu rakenteesta hitaasti ja tiivistystyö kohottaa aluksi lähinnä maakerroksen huokospainetta. (Tie- ja vesirakennushallitus, 1968)

Tiivistyskalustoksi runsaasti hienoaainesta sisältäville maille suositellaan kumipyöräjiä, valssijyriä ja sorkkajyriä. Useassa eri vesipitoisuudessa tehdystä Proctor-kokeesta saadaan maa-aineksen maksimikuivatilavuuspaino. Luonnontilaisessa vesipitoisuudessa tehdyn Proctor-kokeen ja maksimikuivatilavuuspainon osamääränä saadaan tiiviysaste, joka enintään saavutetaan. Jos tavoitteena on saavuttaa 95 tai 90 %:n tiiveysaste, savilla tavoite jää usein saavuttamatta, jolloin on odotettavissa jälkipainumia. (Tie- ja vesirakennushallitus, 1968)

Benson ryhmineen (1999) raportoi tekemästään laajasta savitiivistetutkimuksesta. Ryhmä testasi vedenläpäisevyyttä kymmenillä koekentillä. Tavoitteena oli saavuttaa vedenläpäisevyyskerotoimen arvo $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s. Tiivistys tehtiin erilaisille stabiloimattomille saville. Tiivistystulokset osoittivat, että ainoastaan 74 prosentilla koekentistä oli saavutettu tavoitevedenläpäisevyys. Tiivistyksen tulokseen vaikutti merkittävimmin saven vesipitoisuus, jonka tuli hyvän tuloksen saavuttamiseksi olla hieman optimivesipitoisuutta suurempi. Myös kerroksen paksuus ja tiivistyskertojen määrä vaikuttivat ratkaisevasti vedenläpäisevyyteen. Sen sijaan esimerkiksi indeksiominaisuuksilla, kuten raekokoja-kaumalla ja konsistenssirajoilla, kerrottiin olevan vähemmän merkitystä tulosten kannalta – vaatimukset täyttävä tiivistekerros on mahdollista rakentaa monenlaisista savista.

Toisaalta, erittäin yksityiskohtaisia suosituksia savitiivistemateriaalin ominaisuuksista esitetään Suomen ympäristökeskuksen (Syke) julkaisussa Kaatopaikan tiivistysrakenteet (2002):

- savipitoisuus ($< 2 \mu\text{m}$) vähintään 14 %, josta plastisuusominaisuuksien saavuttamiseksi vähintään 10 prosenttiyksikköä savimineraaleja,
- plastisuusindeksi savitiivistyksen materiaalille > 10 %, juoksuraja < 90 %,
- maksimiraekoko 32 mm, pintakerroksessa voidaan asettaa suurempi vaatimus,
- orgaanisen aineen määrä < 2 %,
- karbonaattimineraalien määrä < 15 % ja muiden liukenevien aineiden yhteismäärä < 5 % (esim. sulfaatit),

- kutistumiskäyttäytyminen: tilavuuskutistuma $< 5 \%$,
- biologisesti ja kemiallisesti rasituksia kestävä,
- tasalaatuinen massa ja
- massa ei saa sisältää yli 32 mm savi- tai silttipaakkuja.

Syken julkaisussa annetaan myös tiivistyskerrokselle ohjeellinen leikkauslujuusvaatimus 50 kN/m^2 . Kantavuusvaatimusten kerrotaan riippuvan käytettävästä materiaalista. Suunnittelija määrää kantavuusarvot koetiivistyksen ja laboratoriokokeiden tulosten sekä kokemuksensa perusteella. Oppaassa on annettu selkeät ohjeet koetiivistystä varten rakennettavan koekentän suunnittelusta ja työn toteutuksesta sekä näytteenotosta.

Levittämisessä ja tiivistämisessä tärkeimpinä kriteereinä Syken oppaassa mainitaan kuivatilavuuspaino ja vesipitoisuus. Vesipitoisuuden ollessa liian pieni toivottua vedenläpäisevyyttä ei saavuteta epätäydellisen tiivistymisen vuoksi. Liian suuren vesipitoisuuden johdosta työkoneiden liikkuminen vaikeutuu, luiska-alueet saattavat olla epästabiileja ja kuivumishalkeilu on mahdollista. Myös tässä julkaisussa esitetään, että vesipitoisuuden on tärkeää olla standardilla Proctor-kokeella saatua optimivesipitoisuutta suurempi. Kuivatilavuuspainon tulee olla $> 95 \%$ standardilla Proctor-kokeella optimivesipitoisuudessa saavutetusta maksimikuivatilavuuspainosta. (Suomen ympäristökeskus, 2002)

5.1.3 Vedenläpäisevyys

Valtioneuvoston päätöksen 861/1997 liitteessä 1 ”Kaatopaikalle asetettavat yleiset vaatimukset” esitetään, että pohjarakenteiden yhdistetyn vaikutuksen on vastattava seuraavia vedenläpäisevyys- ja paksuusvaatimuksia:

- ongelmajätteen kaatopaikalla $k \leq 1,0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, paksuus $\geq 5 \text{ m}$,
- tavanomaisen jätteen kaatopaikalla $k \leq 1,0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ paksuus, $\geq 1 \text{ m}$ ja
- pysyvän jätteen kaatopaikalla $k \leq 1,0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, paksuus $\geq 1 \text{ m}$.

Edellä annettuja vedenläpäisevyysvaatimuksia noudattaen voidaan laskea eri paksuisilta tiivistyskerroksilta vaadittava vedenläpäisevyys. Laskenta perustuu Darcyn lakiin, kaava (9).

$$v = \frac{Q}{A_v} = -k \frac{dh}{dx} = ki \quad (9)$$

v on	veden virtausnopeus, m/s
Q	virtaavan veden määrä, m ³ /s
A _v	virtauksen poikkileikkauspinnan ala, m ²
k	vedenläpäisevyyskerroin, m/s
h	veden painekorkeus, m
x	etäisyyskoordinaatti virtauksen suunnassa, m
i	hydraulinen gradientti

Darcyn kaavan avulla voidaan vertailla paksuudeltaan ja vedenläpäisevyydeltään erilaisia tiivistysrakenteita. Jos tavanomaisen jätteen kaatopaikalle halutaan rakentaa valtioneuvoston päätöksen vaatimuksia vastaava tiivisterakenne, jonka paksuus on 0,5 metriä, vedenläpäisevyyskerroin k_2 lasketaan käyttäen oletuksena yhden metrin korkuista vesipatsasta tiivistysrakenteen yläpinnassa. Tässä tapauksessa $k_1 = 1 \times 10^{-9}$ m/s, $i_1 = h_1/x_1 = 2$ m/1 m ja $i_2 = h_2/x_2 = 1,5$ m/0,5 m. Koska $v_1 = v_2$, saadaan kaavalla (10) 0,5 metriä paksun tiivistyskerroksen vedenläpäisevyyskerrotimeksi $k_2 = 6,7 \times 10^{-10}$ m/s. (Suomen ympäristökeskus, 2002)

$$k_2 = \frac{k_1 i_1}{i_2} = \frac{1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s} \cdot 2}{3} = 6,7 \cdot 10^{-10} \text{ m/s} \quad (10)$$

k_2 on	vedenläpäisevyyskerroin, kun tiivisterakenteen paksuus on 0,5 m, m/s
i_2	hydraulinen gradientti, kun tiivisterakenteen paksuus on 0,5 m
k_1	vedenläpäisevyyskerroin, kun tiivisterakenteen paksuus on 1,0 m, m/s
i_1	hydraulinen gradientti, kun tiivisterakenteen paksuus on 1,0 m

Routiminen tarkoittaa maan tilavuuden kasvamista maassa olevan veden jäätyminen seurauksena. Routimisen edellytyksiä ovat routivan maa-ainestyyppin ohella jäätymisrintamassa oleva tai sinne kulkeutuva vesi ja jäätyislämpötilan alittava lämpötila. Jäätyminen aiheuttaa maan rakenteeseen muutoksia, joiden suuruus riippuu maan routivuudesta. Savella ja siltillä routaantumisen vaikutus maan ominaisuuksiin on suuri. Myös stabiloidun savirakenteen jäätyminen ja sulaminen saattaa muuttaa maan ominaisuuksia, esimerkiksi kasvattaa maan vedenläpäisevyyttä. Muun muassa kaatopaikkojen mineraalisten tiivistyskerrosten läpäisevyysvaatimukset ovat niin tiukat, että rakenteen jäätyminen on estettävä (Suomen ympäristökeskus, 2002). Tiivistysrakenne ei saa myöskään kuivua siten, että muodostuu vedenläpäisevyyttä lisääviä halkeamia. (Forsman, 1998)

Esimerkiksi kaatopaikoilla käytettävät mineraaliset tiivistyskerrokset paitsi pidättävät vettä, myös sitovat itseensä raskasmetalleja. Raskasmetallien sitomiskykyyn vaikuttavat mm. savimineraalit, ioninvaihtokyky, ominaispinta-ala sekä vallitsevat olosuhteet, esimerkiksi lämpötila. Haitta-aineilla saattaa kuitenkin olla haitallisia vaikutuksia maan plastisuus- ja paisumisominaisuuksiin, minkä vuoksi mineraalisen tiivistyskerroksen kemiallinen kestävyys tulisi testata. (Suomen ympäristökeskus, 2002)

5.1.4 Ympäristökelpoisuus

Sivutuotteiden käyttö maarakentamisessa edellyttää, että sivutuotemateriaalit ovat ympäristökelpoisia. Sivutuotteiden sisältämät haitta-aineet kulkeutuvat ympäristöön liukenevilla tai pölyämällä. Ympäristökelpoisuutta arvioitaessa on huomioitava, että koska sivutuotteet ovat teollisuuden jätettä, niiden laatu saattaa vaihdella merkittävästi. (Wahlström ym., 1999)

Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen osaston julkaisussa Massastabiloitujen ylijäämäsavien käyttö maarakentamisessa (Mäkelä ym., 2000b) esitetään joitakin yleisiä käytäntöjä koskien massastabiloidun saven käyttöä. Julkaisussa suositellaan, että stabiloituja savirakenteita käytettäisiin noin metrin verran pohjaveden pinnan yläpuolella. Käytäntö vähentää haitta-aineiden liukenemista pohjaveteen. Varsinkin teollisuuden sivutuotteilla stabiloitua savea on käytettävä harkiten pohjaveden pinnan alapuolella. Toisaalta stabiloitujen savirakenteiden käyttö rajoittuu lähinnä juuri savikkoalueille, joilla ylijäämäsavia syntyy – ei vaativille pohjavesialueille.

5.2 Toteutettuja rakennushankkeita

5.2.1 Tiivistysrakenteet

Vuosaaren satama, Melumäki

Helsingin Vuosaaren satamahankkeen yhteydessä telakka-alueelta peräisin olevat pilaantuneet maamassat sijoitetaan Melumäeksi kutsuttuun meluesteeseen, kuva 16. Melumäkeen saa ympäristöluvan mukaan sijoittaa enintään 140 000 kuutiota pilaantuneita maita.

(Vuosaaren satamahanke, 2005a) Melumäen ensimmäinen vaihe toteutettiin vuonna 2004 ja toinen vaihe 2005. Kolmannen vaiheen rakentaminen on käynnissä. Melumäen rakentamisesta kerrotaan laadunvalvontaraporteissa (Forsman & Hakari 2004 ja 2006).

Melumäen rakentamisessa hyödynnettävät pilaantuneet maa-ainekset sisältävät raskasmetalleja ja arseenia. Jättemaa ympäröidään suojakerroksilla. Pintarakenne vähentää veden imeytymistä jätetäyttöön, estää kosketuksen pilaantuneisiin massoihin ja toimii kasvualustana. Pohjaeristys estää suotovesien ja pilaantuneiden massojen kosketuksen pohjaveen. Lisäksi pystyeristysseinä toimii esteenä veden vaakasuuntaiselle virtaukselle.

Pohjaeristyskerrosten rakentamisessa käytetään pysyvän jätteen sijoittamisen ohjeita ja normeja: yhden metrin mineraalisen tiivistyskerroksen vedenläpäisevyyden tulee olla $k \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s. Kohteessa päädyttiin koekentän perusteella käyttämään 0,4 metrin tiivistyskerrosta, joten vedenläpäisevyyden tulee olla $k \leq 5,7 \times 10^{-8}$ m/s. Myös pystyeristysseinän paksuus on 0,4 metriä. Pintarakenne tehdään bentoniittimatoista, joiden vedenläpäisevyysvaatimus on $k \leq 5 \times 10^{-9}$ m/s.

Alue, jolle Melumäki rakennetaan, on suureksi osaksi savikkoa. Paikoin jopa kuuteen metriin ulottuvan savikon alla on silttiä, hiekkaa ja moreenia. Pohjamaa vahvistettiin massa- ja pilaristabiloimalla sekä tekemällä massanvaihtoja.

Mineraalisen pohjatiivisteen ja pystyeristysseinän materiaalina käytetään massanvaihdon kohdalta kaivettua stabiloitua savea. Stabilointiaineena pohjanvahvistuksessa on käytetty Yleissementtiä, jota on lisätty saveen 50 kg/m^3 . Stabilointityö on tehty pilaristabilointikoneella. Ennen rakenteeksi tiivistämistä ylöskaivettu stabiloitu savi varastoitiin kasalla Melumäen läheisyydessä.

Pohjan tiivistystyössä käytettiin kaivukoneeseen kiinnitettyä tärylevyä. Osassa kenttää kokeiltiin myös käsikäyttöistä 1,3 tonnin sorkkajyrää, joka märkyydestä johtuen vaihdettiin tärylevyyn. Rakenne toteutettiin kahtena 0,2 metrin kerroksena ja paksuutta seurattiin mittasapluunalla. Pystyeristysseinä rakennettiin vanerimuottien avulla. Muotit nostettiin ylös, kun rakenne oli valmis. Tiivistyksessä käytettiin kaivinkoneen kauhaa ja sileävalssijyrää.



Kuva 16 Pilaantuneita maita sijoitetaan Melumäkeen 3/2005 (Vuosaaren satamahanke, 2005b)

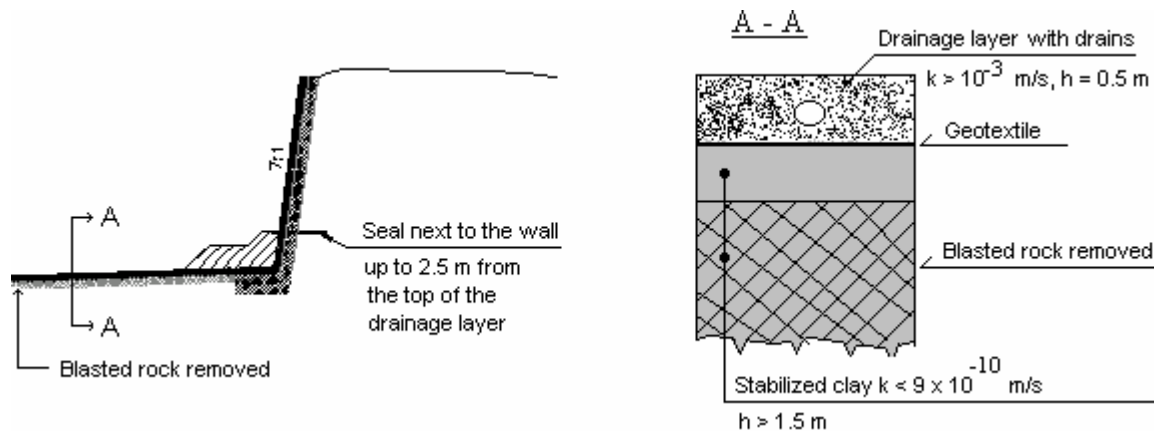
Ennen rakentamisen aloittamista materiaalin soveltuvuus testattiin laboratoriokokein. Kokeissa tutkittiin näytteiden vesipitoisuus ja vedenläpäisevyys. Myös rakeisuuskokeita tehtiin. Valmistuneille alueille tehdyt kenttäkokeet osoittavat, että rakenteen vedenläpäisevyys täyttää vaatimukset. Näytteiden vesipitoisuudet vaihtelivat, mutta sillä ei ollut vaikutusta näytteiden vedenläpäisevyyksiin. Myös kuivatilavuuspainon tavoitearvo 11 kN/m^3 saavutettiin useimmissa tapauksissa.

Kivikko, ampumaratamaat

Espoon Leppävaaraan rakennetun ostoskeskuksen ylijäämäsavea käytettiin Helsingin Kivikossa lyijypitoisten ampumaratamaiden kapselointiin. Työ toteutettiin vuoden 2001 kesän ja syksyn aikana ja siitä kerrotaan julkaisussa Ravaska ym. (2003). Täyttömäki, johon

saastuneet maa-ainekset sijoitettiin, luokiteltiin ongelmajätteen kaatopaikaksi (Jauhiainen & Vahanne, 2001).

Kapseloitava maa-aines oli pääosin turvetta, jonka vesipitoisuus oli korkea. Maa-aines eristettiin pohja- ja pintarakenteiden avulla. Pintarakenne estää suotovesien pääsyn turpeeseen ja sen toiminta on pitkällä aikavälillä rakenteen toiminnan kannalta ratkaisevaa. Turpeessa oleva vesi poistuu konsolidoitumisen myötä. Pohjatiivisteen tehtävä on estää lyijyllä saastuneen veden pääsy kosketuksiin pohjaveden kanssa sekä valmiissa rakenteessa että rakentamisen aikana. Pohjatiivisteen päälle rakennettiin kuivatuskerros, joka johtaa turpeesta erkanevan ja pintarakenteen läpi mahdollisesti suotautuvan veden pois. Kuvassa 17 esitellään kapseloinnin pohjarakenne. Pohjalle tehtiin 1,5 metrin tiivistyskerros stabiloidusta savesta. Kerroksen vedenläpäisevyyden tulee olla $k < 9 \times 10^{-10}$ m/s. Sen päälle rakennettiin 0,5 metriä paksu kuivatuskerros, vedenläpäisevyydeltään $k > 10^{-3}$ m/s.



Kuva 17 Kivikon kapseloinnin pohjarakenne (Ravaska ym., 2003)

Tiivisterakenteen materiaalina käytetty Leppävaaran savi oli täysin vedellä kyllästettyä ja pehmeää. Saven vesipitoisuus vaihteli välillä 50...90 % ja savipitoisuus välillä 40...88 %.

Savi kuljetettiin rakennuspaikalle vesitiiviillä lavoilla, koska se oli täysin juoksevaa. Kivikon työmaalla savi varastoitiin maahan kaivettuihin altaisiin, joiden pohjille oli pantu

geotekstiilit. Saveen sekoitettiin sementtiä, jotta sen työstettävyys paranisi, sillä luonnon-tilaisena saven tiivistäminen rakenteisiin ei olisi onnistunut. Saven plastisuus- ja vedenläpäisevyysominaisuudet säilyivät ennallaan sideaineen lisäämisestä huolimatta. Käytetty sementtimäärä oli 30...90 kilogrammaa sementtiä tonnille maa-ainesta.

Sideaine sekoitettiin massastabilointilaitteistolla altaissa olevaan saveen. Sekoituksen jälkeen massa sai lujittua 6...12 tuntia, jonka jälkeen se oli työstettävää. Alkuvaiheessa savi-sementtiseokseen lisättiin bentoniittia riittävän alhaisen vedenläpäisevyyden varmistamiseksi. Laboratoriokokeilla varmistettiin, että savi-sementtiseos on riittävän läpäisevätöntä, jolloin bentoniitin lisääminen lopetettiin. Vedenläpäisevyyttä tutkittiin tiivistyskerroksesta otetuista näytteistä vedenläpäisevyysödometrikokein. Kahdeksastatoista näytteestä yhden vedenläpäisevyys ei täyttänyt tavoitearvoa $k < 9 \times 10^{-10}$ m/s. Muut näytteet täyttivät vaatimukset, näytteiden vedenläpäisevyyden keskiarvo oli $4,7 \times 10^{-10}$ m/s.

5.2.2 Tierakenteet

Viikin savikatu, ajoradan tukikerros

Viikin savikatu -projekti oli osa Helsingin kaupungin 1990-luvulla toteuttamaa kehitystyötä, jonka tavoitteena oli lisätä saven hyötykäyttömahdollisuuksia massastabiloinnilla. Projekti on raportoitu Viikin savikatu -julkaisussa (Mäkelä ym., 2000a). Katu, jonka ajoradan tukikerros tehtiin stabiloidusta savesta, rakennettiin Helsingin Viikkiin, ekorakennusalueelle Tilanhoitajankaarelle. Savikadun rakentaminen tapahtui vuonna 1997.

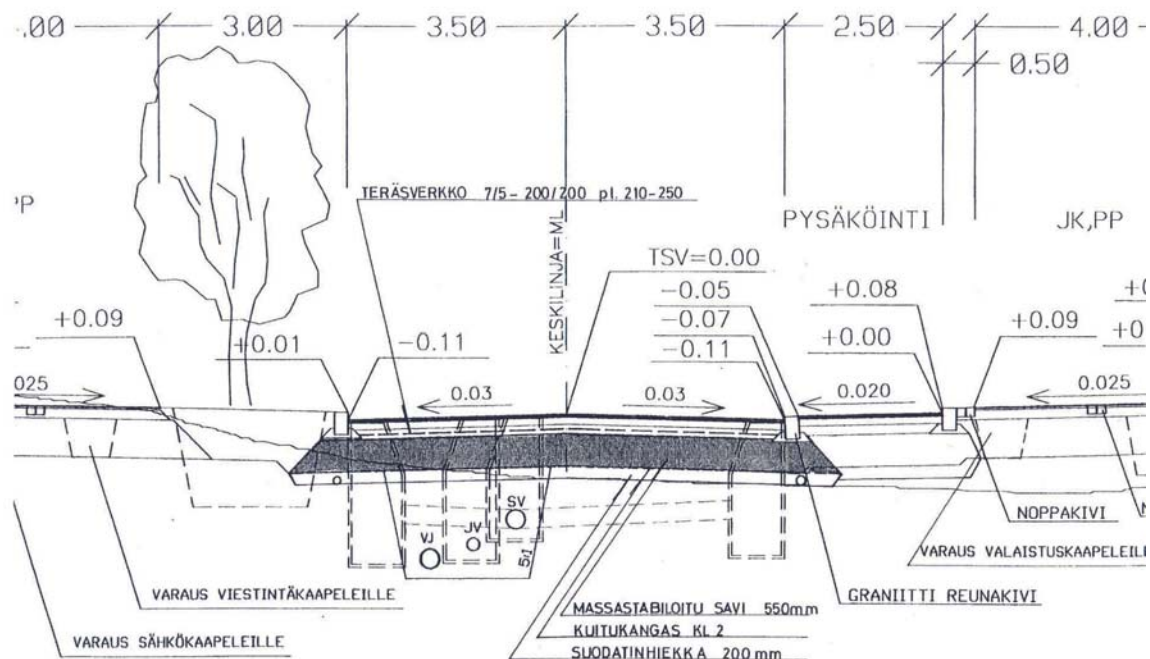
Projekti aloitettiin laajalla laboratoriotutkimusohjelmalla. Koekappaleita tehtiin eri sideaineilla ja sideainemäärillä ja niille tehtiin yksiaksiaaliset puristuskokeet, routanousukokeet, jäädytys-sulatuskokeet, lämmönjohtavuuskokeet, CBR-kokeet, dynaamiset kolmiaksiaalikokeet, vedenläpäisevyyskokeet ja liukoisuustestit. Näytteiden tekemisessä ja säilytyksessä pyrittiin simuloimaan erilaisia rakentamismenetelmiä taulukon 7 mukaisesti. Kokeissa testattu savi oli otettu Viikki-Latokartanon alueelta, syvyydeltä 1,5...3,6 metriä. Vesipitoisuus oli 54...84 %. Rakeisuutensa perusteella savi oli lihavaa ja routivaa.

Taulukko 7 Stabilointi- ja rakentamismenetelmien simulointi laboratoriotutkimuksissa (Mäkelä ym., 2000a)

vaihe	rakentaminen		laboratorio	
lähtötilanne	Sa, w = 60...80 %		Sa, ämpäreissä, w = 60...80 %	
sideaineen sekoitus	menetelmä 1: seulamurskain tai vastaava	menetelmä 2: massa- ja pila-ristabilointilaite	sideaineet sekoitettiin kuivana mekaanisesti sekoitinkärjellä	
esilujittuminen	menetelmä 1: stabiloitu massa lujittui tiivistämättömänä kasassa	menetelmä 2: stabiloitu massa lujittui in situ	menetelmä 1: massa tiivistämättömänä muovipussiin	menetelmä 2: massa sullottiin näyteputkeen, 1-aks. puristuskoe
massan kuormaus ja siirto	menetelmä 1: massa kuormattiin ja kuljetettiin käyttökohteeseen	menetelmä 2: massa kaivettiin, kuormattiin ja kuljetettiin käyttökohteeseen	massa murskattiin, # < 10 mm, kun t = 28 vrk	
tiivistäminen ja jälkilujittuminen	massa tiivistettiin rakennuskohteessa		murskattu materiaali tiivistettiin routakestävyysmäärittystä varten, kun t = 28 vrk, jälkilujittuminen	
lopullinen rakenne	valmis rakenne		routakestävyysmääritykset, kun t = 42 vrk/56 vrk (routivuus, jäädytys-sulatuskestävyys, lämmönjohtavuus, kantavuus, sulamispehmeneminen)	

Laboratoriossa tutkittiin ensin puristuslujuuden perusteella parhaat sideaineet, sideaineyhdistelmät ja seossuhteet. Näin kartoitetuista sideaineista koerakenteeseen valittiin routakestävyyskannalta parhaiten soveltuvat: jauhettu masuunikuona-sementtiseos (70:30), sementti-kalkkiseos (95:5) ja Lohja Rudus Oy Ab:n sivutuotepohjainen E1-sideaineseos.

Savikadun suunnittelussa mitoittavana tekijänä oli rakenteen routakestävyys. Sitä voitiin säädellä sideaineiden määrällä. Tukikerroksen tavoitekantavuus oli 136 MN/m², jonka mukaan tehtiin kuormituskestävyyden mitoitus ja reseptien valinta. Koerakenteen massa-stabiloidusta savesta rakennettava tukikerros oli 550 mm paksu, kuva 18. Sen päälle tuli kantava murskekerros, 200 mm, jonka päälle tehtiin päällystekerrokset. Tukikerroksen alle tuli eristyskerros hiekasta. Koerakenteeseen käytettiin savea noin 500 m³ teoreettisen 420 kuutiometrin sijaan, koska savea levisi työn aikana alueen ulkopuolelle. Koerakenteessa käytetty savi otettiin Viikin pellolta 1...2,5 metrin syvyydeltä. Sen vesipitoisuus oli noin 50...60 %. Stabilointi tehtiin edellä mainituilla kolmella sideaineella, joita käytettiin kutakin 14 % saveen märkäpainosta.



Kuva 18 Viikin savikadun tyypipoikkileikkaus (Mäkelä ym., 2000a)

Savi sekoitettiin Ideachip Oy:n massastabilointilaitteistolla, joka kiinnitettiin kauhan tilalle kaivukoneeseen. Sekoittaminen tapahtui menetelmän 1 mukaan siten, että kaivettu savi kuljetettiin ja kasattiin koerakentamispaikan viereen, siihen mitattiin tarpeellinen sideainemäärä ja sekoitettiin massastabilointilaitteistolla, 2..3 tunnin kuluttua massa siirrettiin rakenteeseen.. Menetelmässä 2 sideaineet sekoitettiin luonnontilaiseen saveen in-situ, savi kuormattiin ja siirrettiin heti rakenteeseen. Tiivistäminen tehtiin tärjyjrällä. Nopeasta kuivumisesta johtuen savirakenteen pinnassa tapahtui verkkohalkeilua, jonka estämiseksi pintaa kasteltiin ja se suojattiin peitteillä.

Kun rakenne oli valmis, päällysteen routanousuja ja painumia, rakenteiden kantavuutta ja tukikerroksen kosteutta ja lämpötiloja valvottiin seurantamittauksilla. Pakkasmäärätietojen ja lämpömittausten avulla arvioitiin roudan kokonaissyvyys. Savikadun routaliikkeet olivat kaikkiaan pieniä ja johtuivat veden jääytymisestä koko rakennepaksuudelta. Tällainen jäätyminen ei riko rakennetta, kuten jäälinsien muodostuminen. Laboratoriossa tehdyissä kantavuusmittauksissa sideaineiden välillä havaittiin eroja, mutta koerakenteissa kantavuudet olivat yhtä suuria. Rakentamista seuranneina kahtena tarkkailuvuotena päällysterakenteessa ei silmämääräisissä tarkasteluissa ollut havaittu vaurioita.

Askersund, tien pohjavahvistus

Ruotsissa toteutettiin vuonna 1996 tien 590 osuuden Askersund-Djupviken (0/050...0/230) pohjavahvistus pilari- ja massastabiloinnilla. Rogbeck (1997) on laatinut raportin projektista. Projektin tarkoituksena oli tutkia stabilointitekniikoiden yhdistämistä; miten massastabiloitu pinta käyttäytyy pilaristabiloinnin päällä. Suunnitellut sideainemäärät olivat 100 kg/m^3 pilaristabiloinnille ja 150 kg/m^3 massastabiloinnille.

Stabilointitekniikoiden yhteensovittamista ei kuitenkaan päästy kokeilemaan, koska pilaristabilointi ei onnistunut odotetulla tavalla. Pilarit eivät saavuttaneet riittävää lujuutta. Massastabilointi toteutettiin tästä huolimatta suunnitellusti. Suurten painumien välttämiseksi stabiloinnin päälle rakennettu pengeri tehtiin kevyestä solumuovista.

Stabiloidulla alueella ylin maakerros, joka oli 1,0...3,5 metriä paksu, koostui liejusta ja osittain turpeesta. Liejun vesipitoisuus oli 130...150 %. Seuraavaksi oli noin 15 metriin ulottuva savikerros, vesipitoisuudeltaan 50...100 %. Siipikairalla saatiin saven leikkauslujuudeksi alimmillaan noin 10 kPa. Saveen ei ollut muodostunut vahvaa kuivakuorikerrosta.

Laboratoriossa 14 vuorokauden iässä tehtyjen lujittumiskokeiden perusteella valittiin massastabiloidun rakenteen mitoittavaksi leikkauslujuudeksi 50 kPa sideainemäärällä 150 kg/m^3 . Kokeissa suurimmat leikkauslujuudet saavutettiin sideaineella Lohjamix V17, joka valittiin käytettäväksi tiepohjan massastabiloinnissa.

Tiepohjan massastabilointi ja solumuovipenger tehtiin huhti-elokuussa. Stabilointi ulotettiin 2,5 metrin syvyyteen tai kovaan pohjaan, jos se oli lähempänä. Stabiloitu massamäärä oli yhteensä 7300 m^3 . Stabilointityö toteutettiin lohkoittain, yhden lohkon koko oli noin 60 m^3 . Jokaisesta lohkoista rekisteröitiin käytetty sideainemäärä (kg) ja sekoitusaika.

Massastabiloinnissa käytetty sekoitinlaite kiinnitettiin tavallisen hydraulisen kaivukoneen viisimetrisen puomiin. Sekoitin oli kolmilapainen ja sen halkaisija oli 900 millimetriä. Stabilointiaineen syöttöaukko sijaitsi aivan sekoitussiipien yläpuolella. Sideaine syötettiin ilmanpaineen avulla. Syötettyä sideainemäärää ja sekoittimen pyörimisnopeutta seurattiin

kaivukoneen hytin rekisteröintilaitteesta. Sekoitus tapahtui järjestelmällisesti koko lohkon tilavuudelta, sekä pysty- että vaakasuunnassa. Sekoitukseen kului noin kaksi tuntia lohkoa kohti. Kun yksi lohko oli saatu stabiloitua, levitettiin sen päälle geotekstiili. Tekstiilin päälle lisättiin vielä 0,5 metriä paksu täyttö, joka toimi koneiden työalustana seuraavaa lohkoa stabiloitaessa.

Massa- ja pilaristabiloinnin onnistumista tutkittiin CPT- ja siipikairauksilla sekä ottamalla näytteitä yksiaksiaalista puristuskoetta, kolmiaksiaalikoetta ja kalsiumdioksidimäärän selvittämistä varten. Lisäksi rakenteiden painumia seurattiin painumaputkien avulla.

Siipikairauksissa käytettiin kairakokoa 400 mm x 20 mm. Kairausvastuksen avulla laskettiin stabiloidun maan suljettu leikkauslujuus. Suurin osa kairaustuloksista osoitti leikkauslujuuden olevan 100...140 kPa. Leikkauslujuudet olivat suurimmat kerroksessa, joka ulottuu maan pinnasta 1,5 metrin syvyyteen.

CPT-kairauksissa havainnoitiin kärki- ja vaippavastusta sekä huokospainetta. Kärkivastus vaihteli suuresti, mistä päätellen stabilointitulos oli epähomogeeninen. Kairausten tuloksista saatiin suhteellinen leikkauslujuus syvyyden funktiona. Koska kairausmäärät olivat niin pienet, ettei korjauskertoimien laskeminen stabiloidulle maalle ollut mahdollista, absoluuttisia leikkauslujuuksia ei CPT-kairauksista saatu. Kairattaessa viiden ja kahdeksan viikon ikäistä massastabilointia, ei havaittu leikkauslujuuden muuttuneen merkittävästi. CPT- ja siipikairaustulosten välillä ei ollut minkäänlaista korrelaatiota stabiloinnin epähomogeenisuudesta johtuen.

Yksiaksiaalisessa puristuskokeessa stabiloiduista rakenteista noin kymmenen viikon ikäisinä otettujen näytteiden leikkauslujuuksien keskiarvo oli 26 kPa ja keskihajonta 23. Näytteiden tiheys oli 1,4...1,82 t/m³ ja vesipitoisuus 37...109 %. Noin 25 viikon ikäisten näytteiden leikkauslujuuksien keskiarvo oli 97 kPa ja keskihajonta 55. Tällöin tiheyden arvoksi saatiin 1,56...1,71 t/m³ ja vesipitoisuudeksi 41...52 %. Koekappaleet murtuivat useimmiten pystysuoria leikkauspintoja pitkin. Tiheyden ja leikkauslujuuden välillä ei havaittu minkäänlaista korrelaatiota. Sama pätee vesipitoisuuteen ja leikkauslujuuteen. Tuloksista ei voida luotettavasti päätellä, miten paljon leikkauslujuus on kasvanut näyt-

teenottoajankohtien välillä, koska kymmenen viikon ikäiset näytteet on otettu suurelta alueelta, kun taas 25 viikon ikäiset näytteet ovat pieneltä testialueelta, jolla on mahdollisesti paremmat olosuhteet kuin muualla.

Tutkimalla kalsiumoksidin (CaO) määrää näytteessä, saatiin selville sen sisältämä sideainemäärä. Näytettä kuivattiin ja hienonnettiin 100 gramman erä. Erästä otettiin yksi gramma kalsiumoksidimäärän selvittämiseksi. Maa-aineksen luontaisesti sisältämän CaO:n määrä oli selvitetty aiemmin, kuten myös sideaineen CaO-määrä. Tulokset kertoivat sideainemäärän suuresta vaihtelusta maa-aineksessa. Mittausten perusteella ei löydetty selkeää yhteyttä sideainemäärän ja leikkauslujuuden välille, vaikka kokeet tehtiin samoille näytteille, taulukko 8. Lisäksi kaksi kuukautta stabiloinnin jälkeen otettiin näytteet, joiden annettiin lujittua vielä kahdeksan kuukautta. Näille näytteille tehtiin kolmiak-siaalikoeket ja leikkauslujuuksiksi saatiin 42 kPa ja 50 kPa. Yhdelle vastaavalle näytteel-le tehtiin yksiaksiaalinen puristuskoe, jonka antama lujuus oli 30 kPa.

Taulukko 8 Sideainemäärä kuutiometrillä ja leikkauslujuus yksiaksiaalisessa puristuskokeessa (Rogbeck, 1997)

Näyte ja syvyys	g CaO/kg kuivaa materiaalia	$\rho_{\text{maa-perä}} \text{ (t/m}^3\text{)},$ arvioitu	luonn. vesipitoisuus (-), arvioitu	sideainemäärä/ m ³ maata	leikkauslujuus (kPa) 1-aks. puristuskokeessa
0/175 (2,25-2,45)	198	1,4	1,40	255	30
0/220 (1,48-1,68)	89,5	1,65	0,55	157	68
0/220 (1,95-2,15)	63,0	1,65	0,55	100	20
0/222 (0,37-0,57)	54,1	1,5	0,55	75	65
0/223 (0,29-0,49)	74,1	1,5	0,55	112	103
stabiloimaton maa 0/100 (3 m)	9,7				
Lohjamix	619				

Tieosuuden painumia kerrotaan seuratus puolentoista vuoden ajan. Jotta pystyttiin erottamaan massastabiloidun kerroksen painuma kokonaispainumasta, havaintoputkia oli asennettu massastabiloinnin ylä- ja alapuolelle. Massastabilointi oli seuranta-aikana painunut yhteensä 240...340 mm eli 10...14 %. Puolentoista vuoden kuluttua rakentamisesta stabiloidun aineksen painuminen vaikutti pysähtyneen; vuoden ja puolentoista vuoden ikäisen rakenteen painumamittauksissa ei havaittu suuria eroja. Stabiloinnin alapuolisessa

savessa mitattiin puolitoista vuotta rakentamisen jälkeen 370...420 millimetrin painumat. Savessa painumat tapahtuivat odotettua nopeammin, ilmeisesti johtuen pilaristabiloinnin huokosveden poistumista edistävästä vaikutuksesta.

Tutkimukset osoittavat, että suppeat paikalliset heikkousvyöhykkeet eivät vaikuta massa-stabiloinnin toimintaan merkittävästi. Suuret heikkousvyöhykkeet saattavat kuitenkin aiheuttaa vaikeuksia painumien ja stabiliteetin osalta.

5.2.3 Täytöt ja pengerrakenteet

Vuosaaren ja Herttoniemenrannan koekentät

Osana Tekesin rahoittamaa Ympäristögeotekniikkaohjelmaa testattiin erilaisilla si-deaineseoksilla stabiloitujen liettyvien ylijäämämaiden soveltuvuutta ympäristörakentamiseen. Teknologia katsauksessa 70/99 (Rämö, 1999), esitellään kokeilu, jossa selvitettiin kivihiilivoimalan sivutuotteiden ja ylijäämäsavien käyttöä maarakentamisessa.

Projektissa savirakenteille annettiin tekniset vaatimukset käyttökohteesta riippuen. Vaatimukset on listattu taulukkoon 9.

Taulukko 9 Projektissa savirakenteille annetut tekniset vaatimukset eri käyttökohteissa (Rämö, 1999)

käyttökohte	leikkauslujuus, minimi (kN/m ²)	E ₂ , minimi (MPa)	muut vaatimukset
täyttöalueet, maisemointi	40	15	koossapysyvyys, tiivistettyys, ei saa häiriintyä
pengertäytöt	50	30 (kova savi 10...15, löyhä hiekka 10...30)	
katujen pengermateriaali	100	150	

Helsingin Vuosaaren ajetuista ylijäämämaista laboratoriotutkimuksiin valittiin viisi. Näytteet olivat laihaa ja lihavaa savea sekä savista silttiä. Niiden vesipitoisuus oli matala, 30...50 %. Lisäksi tutkimuksiin otettiin mukaan yksi ruoppausmassa. Se oli lihavaa savea, vesipitoisuudeltaan 110 %. Ruoppausmassassa oli humusta 1,3 %, muissa maa-aineksissa eloperäistä ainesta oli alle yksi prosentti.

Ensin savet stabilointiin ns. laihoilla sideaineseoksilla, jolloin saveen sekoitettiin neljä tai kahdeksan prosenttia sideainetta. Sideaineena käytettiin kahdeksaa erilaista Lohjamix-seosta. Stabiloitujen savien leikkauslujuus testattiin 30 vuorokauden iässä. Tuloksista nähdään, että mitä suurempi sideainemäärä sitä parempi lujuus yleisesti saavutetaan. Lisäksi lujittuminen riippui lisäaineen sisältämästä aktivaattorimäärästä. Lähes kaikilla maa-aines-sideainetyyppi-sideainemääräyhdistelmillä saavutettiin vähintään 20 kPa:n lujuus. Suurimmillaan lujuudet olivat 150 kPa:n tasolla.

Lisäksi materiaalien stabiloituvuutta tutkittiin lisäämällä niihin täyteaineita 50 % maa-aineksen märkäpainosta. Täyteaineet koostuivat lähinnä teollisuuden sivutuotteista, kuten lentotuhkasta ja rikinpoistotuotteesta, ja niissä käytettiin vain vähän aktivaattoria. Suuri sideainelisäys johti saven nopeaan kuivumiseen ja lujittumiseen. Laboratoriokokeita tehtiin kahdella eri maa-aineksella ja neljällä täyteainetyypillä. 30 vuorokauden leikkauslujuudet vaihtelivat välillä 41...163 kPa. Laboratoriokokeiden perusteella kenttäkokeisiin valittiin parhaat täyteaineet.

Vuosaarella testattiin täyteaineen sekoittamista maa-ainekseen 1,5 metriä syvässä altaassa käyttämällä sekoitukseen massastabilointikärkeä tai kaivinkoneen kauhaa. Kaivinkoneen kauhalla sekoittaminen oli nopeampaa, mutta sideainetta ei saatu sekoittumaan yhtä hyvin kuin stabilointikärjellä. Stabiloidusta maa-aineksestä otettiin näytteet lujuus- ja sideainekokeita varten. Näytteiden sideainemäärät selvitettiin testillä, joka perustuu CaO:n liukoisuuteen HCl-liuokseen.

Massastabilointikärjellä tai kauhalla sekoitettu maa-aines oli joko murumaista tai kokkareista. Laboratoriossa tutkittiin kaikkia sekoitustyyppejä. Tulokseksi saatiin, että kauhalla sekoitettu murumainen näyte sisälsi eniten sideainetta. Toiseksi eniten sideainetta oli massastabilointikärjellä sekoitetussa murumaisessa näytteessä. Sideainepitoisuudet murumaisissa näytteissä olivat 20 %:n luokkaa ja kokkareisissa näytteissä viiden prosentin tasolla. Sideainemäärätavoite oli 50 %, josta jäätin molemmilla sekoitustavoilla. Saavutetut leikkauslujuudet olivat kuitenkin tasolla 45...100 kPa.

Herttoniemenrannassa kokeiltiin täyteaineiden ja maamassan sekoitusta Allu-seulamurskaimella ja kaivinkoneen kauhalla. Ensimmäiselle erälle tehtiin kolminkertainen sekoitus Allu-murskaimella. Seulaan otettiin 2/3 savea ja 1/3 täyteainetta. Silmämääräinen tarkastelu osoitti maa-aineksen ja täyteaineen sekoittuneen täydellisesti. Sekoituksen jälkeen stabiloitu massa kasattiin ja sen päältä ajettiin tela-alustaisella kaivinkoneella useaan kertaan.

Toinen massaerä sekoitettiin Allu-seulamurskaimella ainoastaan kerran. Maa-aines ja täyteaine eivät tässä tapauksessa sekoittuneet täysin, vaan maamassa tuli ensin seulamurskaimen läpi ja täyteaine sen päälle. Maamassasta ja täyteaineesta muodostuneet kerrokset vaikuttivat alkavan lujittua.

Kolmantena sekoitustapana kokeiltiin kauhasekoitusta, joka tehtiin kolmelle täyteaineelle erikseen. Maamassan päälle tasattiin täyteainekerros ja ainekset sekoitettiin kauhalla muutaman kerran. Kuljettajan oppiessa menetelmän sekoittaminen nopeutui. Tulos ei ollut yhtä tasaista kuin seulamurskaimella, mutta sekoittaminen sujui huomattavasti nopeammin.

Kahden viikon iässä penkereet yhtä lukuun ottamatta eivät olleet riittävän lujia levykuormituskoetta varten. Tämä oli odotettavissa, sillä tiivistys suoritettiin ainoastaan ajamalla penkereen yli tela-alustaisella kaivinkoneella. Koepenkereet koestettiin Loadman-laitteella kuukauden ikäisinä, tulokset ovat taulukossa 10. Lujuudet olivat kaivinkonetiiivistykselläkin riittävät raitin pohjalle, mutta niiden oletettiin edelleen paranevan potso-
laanireaktioiden jatkuessa.

Taulukko 10 Loadman-kantavuuskokeiden tulokset neljän kokeen keskiarvoina kuukauden iässä, täytteellä E stabiloidut näytteet viikon ikäisiä (Rämö, 1999)

sekoituslaite ja -tapa	täyteaine	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₂ /E ₁
Allu, 3 sekoituskertaa	C	65	111	1,7
Allu, 1 sekoituskerta	C	18	58	3,4
kauha	C	70	113	1,8
kauha	B	45	92	2,1
kauha	E	15	54	3,6

Koetuloksista pääteltiin kauhasekoituksen antavan parhaan kantavuuslopputuloksen. Lisäksi kauhasekoitus on helppo järjestää, koska laitteisto löytyy jokaiselta työmaalta. Sekoittaminen kauhan avulla oli myös nopeampaa kuin seulamurskaimella tai sekoitinkärjellä.

5.3 Ylijäämäsaveen hyödyntäminen tulevaisuudessa

Ylijäämäsavea läjitetään usein tarpeettomana maakaatopaikoille. Savi saattaa olla juoksevaa, jolloin läjittäminen on vaikeaa ja vaatii suuren pinta-alan sekä penkereitä savimassan tukemiseksi ja alueen rajaamiseksi. Työkoneiden liikkuminen maakaatopaikan päällä saattaa olla hankalaa. Lisäksi saveen saatetaan joutua sekoittamaan karkeampaa materiaalia kantavuuden ja stabiliteetin parantamiseksi.

Tilanne helpottuisi saveen läjittämisomaisuuksien parantuessa, jolloin kaatopaikat vaatisivat vähemmän pinta-alaa ja liikkuminen niillä helpottuisi. Toisen jättemateriaalin sekoittaminen läjitettävään ylijäämäsaveen, ts. saveen stabiloiminen esimerkiksi lentotuhkalla voisi parantaa saveen läjitysominaisuuksia. Teollisuuden jättemateriaaleja hyödyntämällä kustannukset saataisiin pidettyä riittävän alhaisina.

Ylijäämäsavea on käytetty teiden pohjarakenteissa, kaatopaikkojen ja kapselointien tiivistysrakenteissa, täytöissä ja valleissa. Massastabiloinnin myötä hyödyntämismahdollisuudet edellä mainituissa kohteissa paranevat. Lisäksi savelle voidaan kehittää uusia käyttökohteita. Kuivakuorisavea on perinteisesti käytetty maapatojen tiivistyssydämen materiaalina. Tulevaisuudessa lienee odotettavissa merenpinnan nousua, jonka seurauksena rannikkoalueille saatetaan joutua rakentamaan tulvapatoja. Tulvapatojen tiivistysmateriaalina voitaisiin käyttää huonosti vettä läpäisevää ylijäämäsavea, stabiloitua tai stabiloimatonta.

Rakentaminen siirtyy enenevässä määrin heikosti kantaville pohjamaille, mm. savikoille. Jotta rakentaminen olisi nopeampaa ja taloudellisempaa, olisi tarpeen kehittää menetelmä, jolla savesta saataisiin mahdollisimman pienillä kustannuksilla kantava rakennuspohja. Esimerkiksi yhdistettyä massa-pilaristabilointimenetelmää olisi tarpeen kehittää siten, että savimaakerrokset voitaisiin stabiloida sijaintipaikallaan kantavaksi rakennuspohjaksi.

Jos pilaristabilointi olisi mahdollista massastabiloidun kerroksen läpi, massastabilointi voitaisiin tehdä ensin ja lujittunut kerros voisi toimia koneiden työpetinä. Stabiloimalla savi kantavaksi rakennuspohjaksi vältettäisiin suurten ylijäämämassaerien syntyminen; savea ei tarvitsisi kaivaa, kuljettaa, sijoittaa eikä korvata muulla materiaalilla.

6 Laboratoriotutkimusmenetelmät

6.1 Tutkimukset ja näytteet

Tähän diplomityöhön liittyvät laboratoriokokeet tehtiin Teknillisen korkeakoulun Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa. Tässä luvussa on kuvattu koekappaleiden valmistus ja käytetyt laboratoriotutkimusmenetelmät.

Näytteitä saapui laboratorioon kesä- ja elokuussa 2006. Näytteet oli otettu kolmesta eri savilähteestä. Eri ajankohtina saapuneiden näytteiden käsittelyt poikkeavat osittain toisistaan, joten tekstissä esitetään tarvittaessa kaksi testaus- ja näytteenvalmistustapaa.

6.2 Koekappaleiden valmistus

6.2.1 Vedenläpäisevyysödometrikokkappaleet

Ödometrikokkappaleet valmistettiin sullomalla näyte ödometrenchaaseen pienen metallisen nuijan avulla tai puristamalla ödometrenchas näytteen läpi. Mikäli kyseessä oli selli, jonka rengas oli kiinteä, näyte sullottiin ensin irtorengaaseen ja siirrettiin puristamalla kiinteään renkaaseen, kuva 19. Luonnontilaisten näytteiden ödometrikokeet aloitettiin välittömästi, kun näyte oli sullottu renkaaseen.



Kuva 19 Kiinteä ödometrenchas sellissä, irrotettava rengas ja tiivistysnuija (E. Ruohonen)

Ödometrikokeita tehtiin myös stabiloiduille koekappaleille. Tarvittava määrä sementtiä mitattiin saven joukkoon ja sekoitettiin käsin puristelemalla viiden minuutin ajan. Näyte sullottiin renkaaseen heti sekoittamisen jälkeen. Näytteet, joihin lisättiin stabilointiainetta, säilytettiin irtonaisessa ödometritrenkaassa veden alla huoneenlämpötilassa (n. 22 °C) huokospaperien välissä seitsemän vuorokauden ajan ennen kokeen aloittamista, kuva 20. Näin varmistettiin, että näyte oli vedellä kyllästetty ödometrikokeen alkaessa. Ödometrillä vedenläpäisevyyskokeet ovat nopeita toteuttaa ja vaadittu näytemäärä on pieni.



Kuva 20 Stabiloidun ödometrikoe-kappaleen säilyttäminen veden alla (E. Ruohonen)

6.2.2 Puristuskoekappaleet ja vesipitoisuusnäytteet

Puristuskokeet tehtiin eri sementtimäärillä stabiloiduille saville. Puristuskoe-kappaleita tehtiin kahdenlaisia, sekä standardikokoisia (halkaisija 50 mm, korkeus 100 mm) että pieniä (halkaisija 20 mm, korkeus 40 mm). Pienet koekappaleet eivät ole yleisten laboratorio-ohjeiden mukaisia, mutta kappaleiden pieni koko mahdollistaa suuren näytemäärän ja nopean käsittelyn. Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa on kehitetty puristuskoe-kappaleiden valmistusmenetelmiä osana käynnissä olevaa POHVA-projektia.

Muun muassa pienet koekappaleet ja reiällinen pleksiputki on kehitetty POHVA-projektin tarpeisiin. Tekesin rahoittama VTT:n, Rakentamisteknologian tutkimusryhmän, Oulun yliopiston ja TKK:n yhteinen POHVA-projekti käsittelee tietoverkottunutta, 3D-mallinnukseen ja -mittauksiin perustuvaa pohjavahvistusautomaatiota. Projekti alkoi vuonna 2005 ja siihen liittyen on tehty paljon yksiaksiaalisia puristuskokeita.

Seuraavassa kuvataan koekappaleiden valmistus kesä- ja elokuun näytteistä erikseen.

Koekappaleiden valmistus aloitettiin sekoittamalla ämpärissä ollut savinäyte porakoneen sekoitusterällä homogeeniseksi, kuva 21. Kerralla otettiin n. 200...500 grammaa näytettä, joka pantiin muovipussiin ja johon lisättiin tarvittava sementtimäärä. Näytettä sekoitettiin käsin, puristelemalla muovipussia viiden minuutin ajan.



Kuva 21 Näytteen sekoitus porakoneen sekoitusterällä (T. Stapelfeldt)

Kesäkuun näytteistä koekappaleet valmistettiin sullomalla stabiloitu näyte kehtoon, kuva 22, ja puristamalla näyteruisku kehossa olevaan saveen, kuva 23. Näyteruiskun halkaisija oli 20 mm ja sen sisään jääneen koekappaleen pituus n. 50 mm. Ruiskun sisäpinta oli sivelty silikonilla. Lopuksi, kun näytteet olivat näyteruiskuissa, niitä tiivistettiin 100 kPa:n paineella yhden minuutin ajan. Osa näytteistä säilytettiin huoneenlämmössä, 22 °C, ja osa kuudessa celsiusasteessa kylmähuoneessa.



Kuva 22 Savi on kehossa, joka on kiinnitetty ruuvipuristimella tukeen (E. Ruohonen)



Kuva 23 Näyteruisku puristetaan saveen (E. Ruohonen)

Elokuussa otetuista näytteistä pienet puristuskoekappaleet valmistettiin kuten edellä, mutta ilman silikonilla ruiskun sisäpinnassa. Kaikki näytteet säilytettiin kylmähuoneessa (n.

6 °C). Elokuun näytteistä tehtiin myös standardikokoisia puristuslujuuskoekappaleita. Standardikoekappaleet valmistettiin kukin omana sekoituseränään, muovipussissa viiden minuutin ajan sekoittaen. Sekoituksen jälkeen savimassa sullottiin reiälliseen pleksiputkeen ja puristettiin ilman poistamiseksi, kuva 24. Sitten näyte siirrettiin reiättömään pleksiputkeen, jonka halkaisija oli n. 50 mm ja korkeus n. 140 mm.



Kuva 24 Standardikokoisen koekappaleen tiivistäminen reiällisessä pleksiputkessa (E. Ruohonen)

Pleksiputken toiseen päähän pantiin korkki ja toinen pää jätettiin avoimeksi. Putkia säilytettiin kylmähuoneessa, suodatinkankaan päällä, avoin pää tislatussa vedessä. Putkien päälle pantiin tiiliskivet turpoamisen estämiseksi, kuva 25.



Kuva 25 Standardikokoisten ja pienten puristuskoe­kappaleiden säilytys kylmähuoneessa (E. Ruohonen)

Puristuskokeet tehtiin joko seitsemän tai 28 päivän ikäisille näytteille. Ennen koetta lujituneet koekappaleet lyhennettiin oikean mittaisiksi: pienet koekappaleet 40 mm ja standardikokoiset 100 mm pituisiksi. Menettelyn johdosta näytteen jompaankumpaan päähän mahdollisesti jääneet halkeamat saatiin rajattua varsinaisen koekappaleen ulkopuolelle. Koekappaleen katkaiseminen tehtiin keittiöveitsellä vuolemalla pala kerrallaan, jotta ei aiheutettaisi näytteen halkeilemista, kuva 26.



Kuva 26 Koekappaleiden valmistelu puristuskoetta varten (E. Ruohonen)

6.2.3 Muiden kokeiden valmistelu

Muihin kokeisiin ei valmistettu varsinaisia koekappaleita. Humuspolttoa varten savinäytteet kuivattiin uunissa, noin 105 °C:ssa, yön yli. Tämän jälkeen näytteet hienonnettiin vasaralla metalliastiassa noin viiden millimetrin raekokoon, minkä jälkeen ne olivat valmiita humuspolttoon.

Myös kiintotiheyden määrittäminen aloitettiin kuivaamalla näytteet uunissa ja pilkkomalla ne vasaran avulla pieniksi paloiksi. Sitten käytettiin hienonnusmyllyä, jotta näyte saatiin mahdollisimman hienoksi, kuva 27. Areometrikoetta varten näytteet valmistettiin samoin, kuin näytteet kiintotiheyden määrittämistä varten.

Kokeissa käytetty savi sekoitettiin ämpärissä homogeeniseksi aina ennen näytteen ottamista koetta varten. Sekoittamiseen käytettiin porakonetta ja sekoitusterää.



Kuva 27 Hienonnusvälineet: vasara ja mylly (E. Ruohonen)

6.3 Laboratoriotutkimukset

6.3.1 Luokitusominaisuudet

Luokituskokeet on tehty Suomen geoteknillisen yhdistyksen (1985) ohjeiden mukaan. Näytteiden tutkiminen aloitettiin sekoittamalla ne ämpäriässä porakoneella homogeenisiksi. Tämän jälkeen otettiin 500...600 grammaa näytettä, joka kuivattiin uunissa vesipitoisuuden selvittämiseksi. Lisäksi kuivatusta näytteestä saatiin materiaali rakeisuuden määrittämiseen areometrikokeella, humuspoltoon sekä kiintotiheyden määrittämistä varten. Kartiokokeella määritettiin näytteiden häirityt leikkauslujuudet. Näytteille määritettiin myös juoksurajat. Suurimmalle osalle näytteistä juoksurajan määrittämiseen käytettiin kartiokoetta, muutamalle kokeiltiin myös Casagranden koputuskoetta.

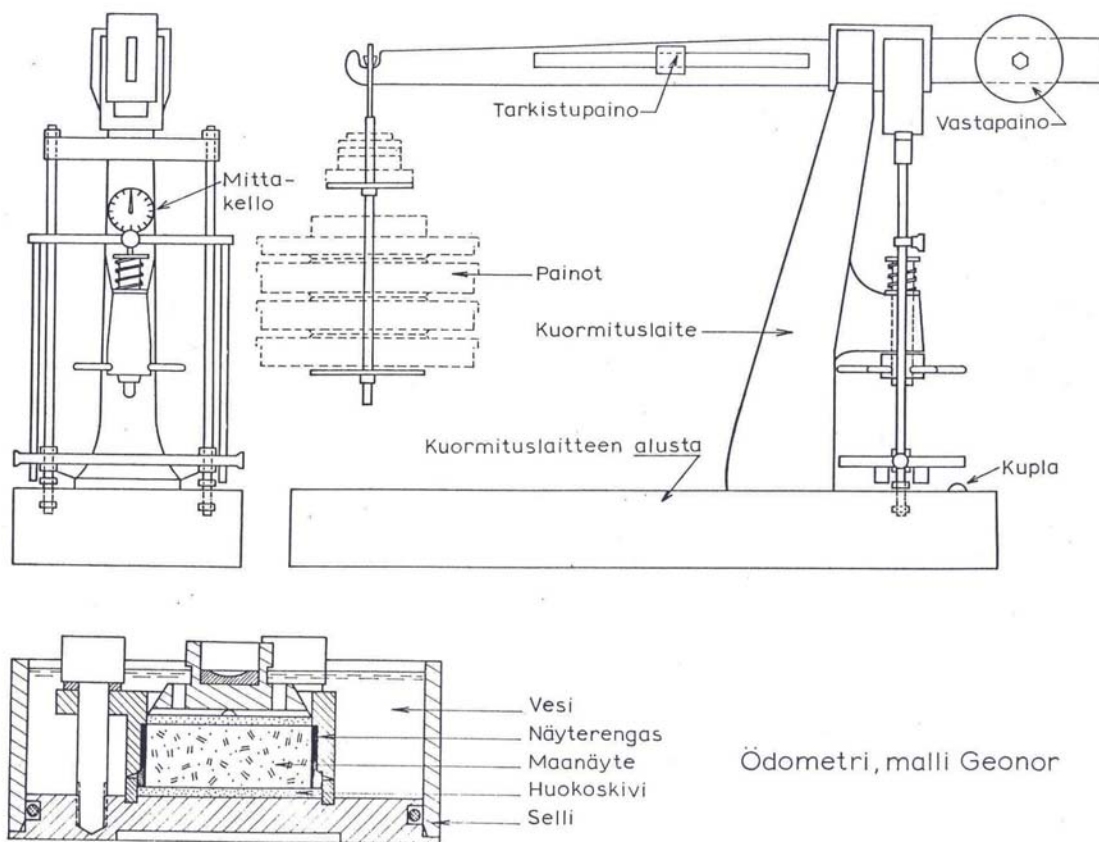
6.3.2 Vedenläpäisevyysödometrikoe

Ödometrikoeita varten koekappale asetettiin joko kiinteään tai irrotettavaan ödometrirenkaaseen, kuva 19. Koekappaleen ala- ja yläpuolelle asetettiin huokoskivet siten, että huokoskivien ja näytteen väliin tuli huokospaperi. Ennen jokaista koetta huokoskivet keitettiin silikonin ja epäpuhtauksien poistamiseksi ja riittävän vedenläpäisevyyden varmistamiseksi, kuva 28.



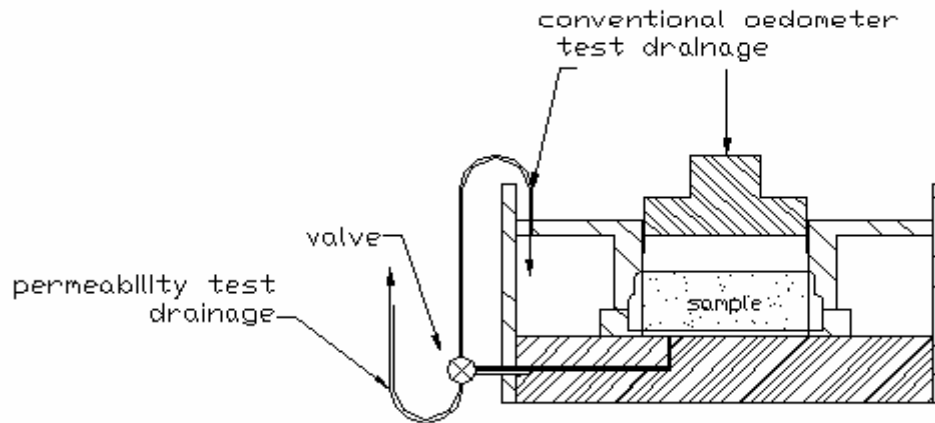
Kuva 28 Huokoskivien keittäminen ennen kokeen aloittamista (E. Ruohonen)

Ödometrikokeella määritetään maalajien painumaominaisuudet. Jäykkä ödometrirengas estää koekappaleen sivusuuntaisen muodonmuutoksen, jolloin koekappaleeseen kohdistettu pystysuora kuormitus aiheuttaa ainoastaan vertikaalista muodonmuutosta. Ödometri-laite ja tavallinen selli esitellään kuvassa 29.



Kuva 29 Ödometri (Korhonen, 1967)

Ödometriin on mahdollista lisätä laitteisto vedenläpäisevyyden mittaamiseksi eri kuormitusportailla, kuva 30. Kuvassa näkyvällä venttiilillä säädetään ödometri joko painumakoeasentoon, jolloin näytteestä poistuva vesi kulkee putkea pitkin ödometrisellin, tai yhdistetään näytteen alapinta byrettiin vedenläpäisevyyden mittaamiseksi muuttuvaputouskokeella. (Estudillo, 2003) Tähän diplomityöhön liittyvissä kokeissa käytettiin ainoastaan vedenläpäisevyyden mittausrakenteilla varustettuja ödometrejä. Kokeet aloitettiin pienillä kuormitusportailla (noin 6,25; 12,5 ja 25 kPa), joiden kesto oli muutamista minuuteista tunteihin. Pienillä kuormitusportailla varmistettiin, että savi kesti kuormituksen eikä pursuillut huokoskivien reunoilta ulos. 50 kPa:n kuormitusportaasta lähtien jokainen porras sai vaikuttaa noin 24 tuntia, jonka jälkeen tehtiin vedenläpäisevyyskoe. Vedenläpäisevyyskokeen ajan koekappaleen korkeus pidettiin muuttumattomana. Myös vedenläpäisevyyskokeen kesto oli noin 24 tuntia.



Kuva 30 Vedenläpäisevyysmittauksiin soveltuva ödometriselli (Estudillo, 2003)

Vedenläpäisevyyskerroin laskettiin tuloksista kaavalla (11). (Estudillo, 2003) Tulokset käsiteltiin MS Office Excel -ohjelmalla.

$$k = 2,30 \cdot \frac{a \cdot L}{A} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (11)$$

k on	vedenläpäisevyyskerroin, m/s
a	byretin poikkipinta-ala, m ²
L	näytteen korkeus, m
A	näytteen pinta-ala, m ²
t ₁ , t ₂	mittausajankohdat, s
h ₁ , h ₂	mittausajankohtia vastaavat vedenpinnan korkeuslukemat, m

Osalle näytteistä mitattuja vedenläpäisevyyksiä vertailtiin laskennallisiin vedenläpäisevyysarvoihin, jotka saatiin kaavoilla (12) ja (13). Kaavoilla laskettiin 50 kPa:sta ylöspäin jokaisen kuormitusportaan vedenläpäisevyys, tulokset kuvattiin puolilogaritmisella asteikolla log k-ε-kuvaajassa, josta saatiin vedenläpäisevyys nollamuodonmuutoksella, k₁.

$$c_v = T_v \cdot \frac{h_i^2}{t_u} \quad (12)$$

c _v on	konsolidaatiokerroin, m ² /a
T _v	t _u :ta vastaava aikatekijä

h_i	maanäytteen korkeus koevaiheen alussa, m
t_U	kokoonpuristumisasteen U savuttamiseen kuluva aika, a

$$k = \frac{c_v \cdot \gamma_w}{M} \quad (13)$$

k on	vedenläpäisevyyskerroin, m/s
c_v	konsolidaatiokerroin, m^2/s
γ_w	veden tilavuuspaino, kN/m^3
M	kokoonpuristuvuusmoduuli, kPa

Konsolidaatiokerroin laskettiin sekä Taylorin että Casagranden menetelmillä. Taylorin menetelmässä käytetty konsolidaatioaste on 90 %, jolloin aikatekijä on 0,848. Casagranden menetelmässä käytetään 50 % konsolidaatioastetta, ja aikatekijä on 0,196. Tietyn konsolidaatioasteen saavuttamiseen kuluva aika, t_{90} ja t_{50} , lasketaan kuvaajilta: Taylorin menetelmässä näytteen korkeus, H, esitetään kuvaajassa, jossa vaaka-akselilla on neliöjuuri ajasta (\sqrt{t} -H-kuvaaja), Casagranden menetelmässä vaaka-akselilla on logaritmi ajasta ($\log t$ -H-kuvaaja).

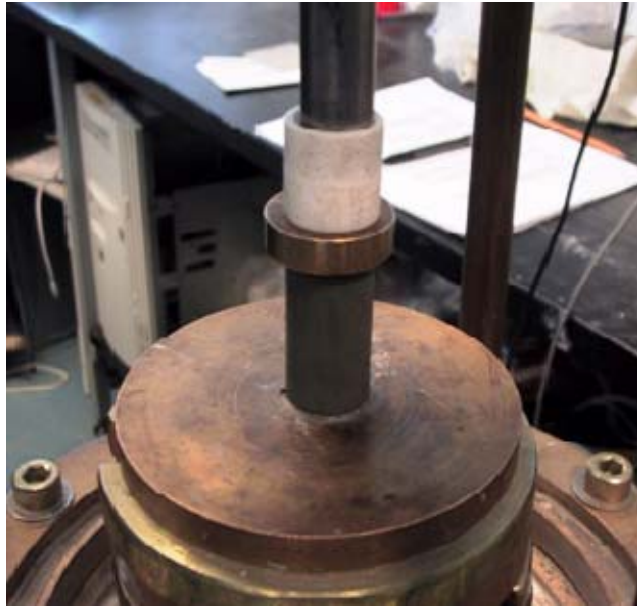
Näytteen vesipitoisuus kokeen alussa ja lopussa saatiin punnitsemalla näyte ennen ja jälkeen kokeen sekä kuivaamalla näyte kokeen jälkeen. Ödometrikokappaleesta laskettiin näytteen huokosluku, huokoisuus, tiheys ja kuivairtitiheys sekä kyllästysaste. Laskelmissa tarvittava kiintotiheyden arvo määritettiin pyknometrikokeella.

6.3.3 Yksiaksiaalinen puristuskoe

Yksiaksiaalisilla puristuskokeilla testattiin stabiloitujen näytteiden puristuslujuus, kuva 31. Valmis koekappale asetettiin alustan ja männän väliin, mahdollisimman keskelle männän pystyakseliin nähden. Puristus tapahtui vakionopeudella, kokoonpuristuma minuutissa oli noin 1 % näytteen korkeudesta. Standardikokoisille puristuskokappaleille nopeus oli 1,0 mm/min ja pienille koekappaleille 0,4 mm/min. Tietokoneohjelma rekisteröi puristuksen (kg) ja tapahtuneen muodonmuutoksen (mm). Koekappaleet kuormitettiin murtoon saakka. Puristuskoe tuloksista saadaan koekappaleen puristuslujuus kaavalla (14).

$$q = \frac{F \cdot g}{A} \quad (14)$$

q on	puristuslujuus, Pa
g	painovoiman kiihtyvyys, m/s ²
F	puristusvoima, kg
A	näytteen poikkipinta-ala, m ²



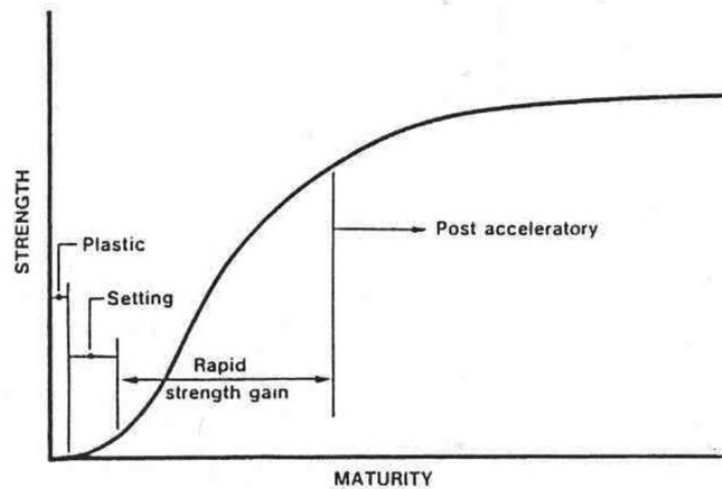
Kuva 31 Pieni koekappale yksiakselisessa puristuskoelaitteistossa (E. Ruohonen)

Kuusipuro (1993) esittää syvästabiloidun maan leikkauslujuuden arviointiin kaavan (15), joka kuvaa maan kypsyysastetta.

$$M_s = [20 + (T - 20)K]^2 \sqrt{t_d} \quad (15)$$

M _s on	kypsyysaste
T	lämpötila aikana t, °C
t _d	lujittumisaika, d
K	vakio, joka riippuu maatyypistä, lämpötilasta ja sideaineesta

Kypsyysasteen ja lujuuden välistä yhteys esitetään periaatekuvassa 32.



Kuva 32 Periaatekuva kypsyyden ja lujuuden riippuvuudesta (Kuusipuro, 1993)

Lujuuskokeiden tuloksia voidaan verrata näytteiden säilytysajalta laskettaviin astevuorokausiin mahdollisen yhteyden selvittämiseksi. Astevuorokaudet ($^{\circ}\text{Cd}$) lasketaan kertomalla koekappaleiden säilytyslämpötila ($^{\circ}\text{C}$) niiden lujittumisajalla (d).

6.3.4 Proctor-koe

Proctor-kokeet tehtiin näytteille luonnontilaisessa vesipitoisuudessa, kuivairtotiheyden selvittämiseksi. Yhteen sekoitettuun näytteeseen lisättiin sementtiä ennen Proctor-koetta. Sementti sekoitettiin savinäytteeseen keittiösekoittimella kahden minuutin ajan.

Kaikki kokeet olivat Standard Proctor -kokeita, joissa käytetty vasara oli 2,5 kg. Suomen geoteknillisen yhdistyksen laboratorio-ohjeissa (1985) suositellaan käyttämään parannettua Proctor-koetta Standard Proctor -kokeen sijaan, mutta parannettu Proctor-koe ei olisi soveltunut tutkitulle savimateriaalille. Savi sullottiin vasaralla kolmessa kerroksessa koesylinteriin, jonka halkaisija oli 102 mm ja korkeus 116 mm. Sullonnan jälkeen kaulusrengas poistettiin ja pinta tasattiin. Sylinterin ja saven massa punnittiin, savinäyte kuivattiin uunissa ja näyte punnittiin myös kuivana. Näin saatiin näytteen tiheys, jonka avulla laskettiin kuivairtotiheys.

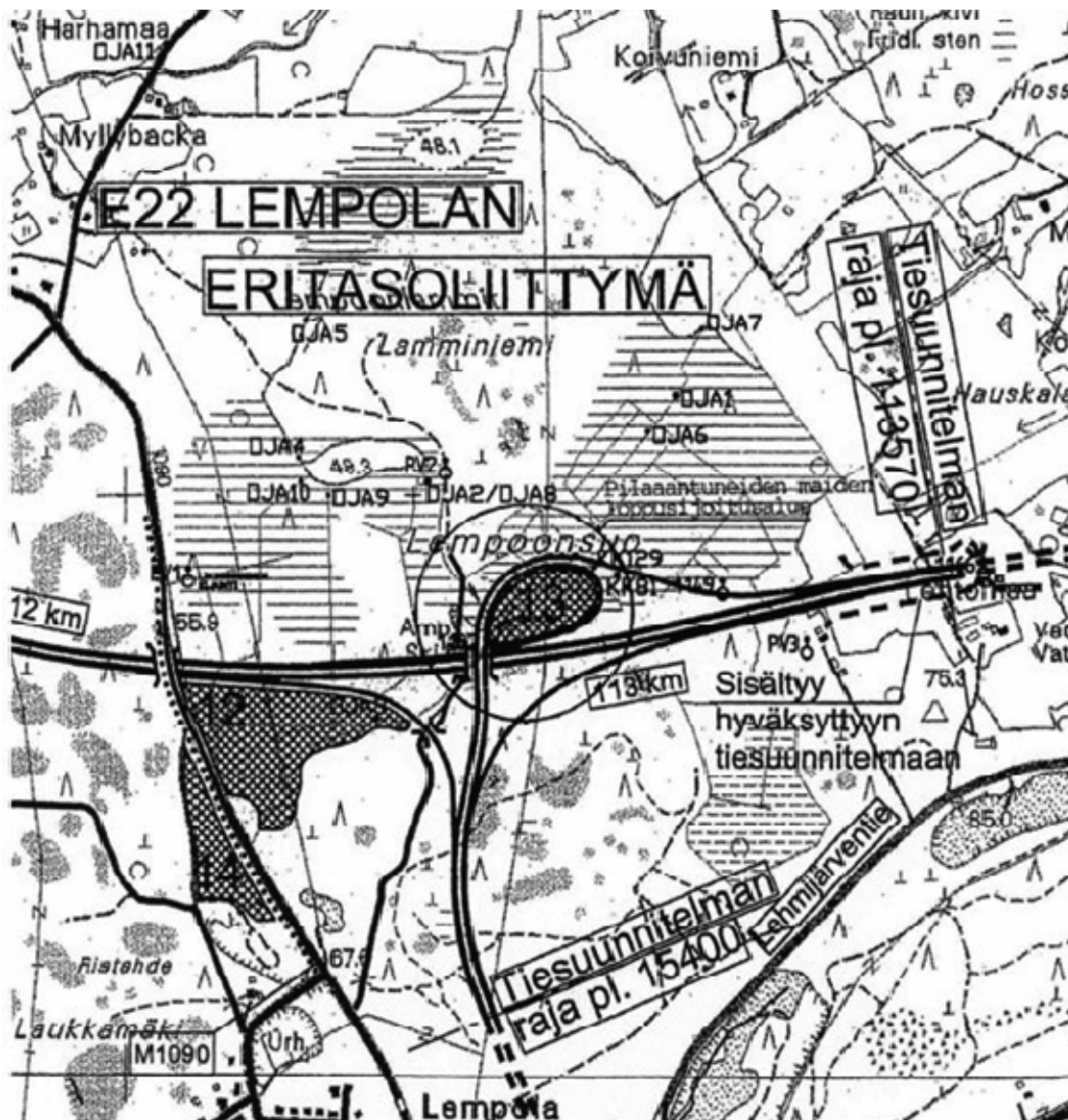
7 Lempolan savi

7.1 Lempolan rakennushanke

Valtatie 1 (E 18) rakennetaan moottoritieksi välillä Oittila-Lempola. Lohjan Lempolan eritasoliittymän alle jää osa Lempoonsuon ampumaradasta. Alueella joudutaan kaivamaan ampumarata-alueen lyijyllä pilaantuneita maamassoja. Massat on päätetty sijoittaa eritasoliittymän ramppisilmukkaan. Lempolan liittymä sijaitsee Lohjanharjun pohjavesi-alueen läheisyydessä, joten sijoituspaikan pinta- ja pohjavesien hallinta on tärkeää. Hanke kuvataan yksityiskohtaisesti Uudenmaan ympäristökeskuksen (2004) ympäristölupapäätöksessä UUS-2003-Y-136-111.

Tiealueelta on poistettava lyijyllä sekä osin mm. arseenilla ja antimonilla pilaantuneita maamassoja. Massat sijoitetaan ramppisilmukan keskelle rakennettavalle loppusijoitusalueelle, kuva 33. Alueelle tullaan sijoittamaan yhteensä 30 000 m³ pilaantuneita maamassoja: 22 000 m³ voimakkaasti pilaantuneita ja 8 000 m³ lievästi pilaantuneita maita. Ramppisilmukan pinta-ala on noin 1,7 ha, josta sijoitukseen käytetään noin hehtaarin kokoinen alue. Pilaantuneet massat välivarastoidaan pohjarakenteen rakentamisen ajaksi.

Pilaantuneiden maiden sijoitusalue ramppisilmukassa tulkitaan ongelmajätteen kaatopaikaksi. Valtioneuvoston päätöksen mukaan ongelmajätteen kaatopaikan pohjarakenteen on oltava vähintään 1,0 metriä paksu ja vastattava vedenläpäisevyydeltään ≥ 5 metrin kerrosta, jonka vedenläpäisevyys on $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s. Näillä vaatimuksilla 0,5 metrin kerroksen vedenläpäisevyysvaatimukseksi saadaan $4,0 \times 10^{-10}$ m/s. Sijoituspaikalle on kuitenkin myönnetty ympäristölupa, jonka mukaan sallitaan $k \leq 6,7 \times 10^{-10}$ m/s. Tämä vastaa tavanomaisen jätteen sijoituspaikan vaatimuksia ja on noin 1,7-kertainen ongelmajätteen kaatopaikan vaatimukseen verrattuna. Lupa myönnettiin, koska sijoitettavassa jätteessä haitta-aineet ovat kiinnittyneet maamassaan. Lisäksi pintarakenne, joka on suunniteltu ongelmajätteen kaatopaikan vaatimusten mukaiseksi, estää sadeveden pääsyn huuhto-



Kuva 33 Pilaantuneiden maiden loppusijoitusalue, Lempola (Uudenmaan ympäristökeskus, 2004)

maan pilaantunutta maamassaa. Riskiarvioinnin mukaan loppusijoituksesta ei aiheudu kuormitusta pohjaveteen.

Pohjan tiivistyskerroksen päälle asennetaan 2 mm paksu HDPE-muovikalvo. Kalvon päälle rakennetaan 0,5 metriä paksu kuivatuskerros. Kuivatuskerroksen materiaalina käytetään salaojasoraa. Kuivatuskerroksen ja jätemaan väliin rakennetaan suodatinkerros. Pilaantunut maa levitetään ja tiivistetään sijoituspaikalle puolen metrin kerroksina. Täytön kokonaispaksuudeksi tulee noin kolme metriä. Sijoitettavista massoista vapautuu vet-

tä yhteensä noin 7 000 m³ ja täyttötyön aikaiseksi sademääräksi arvioidaan noin 4 000 m³. Tästä vesimäärästä noin puolet poistuu täyttämisyvaiheen aikana. Jäljellä olevan veden oletetaan suodautuvan noin kahden vuoden kuluessa valmiista rakenteesta. Suodautuneet vedet johdetaan tarkkailukaivoon.

Kun täyttö on määräkorkeudessaan, sen pinta tasataan. Päälle rakennetaan esimerkiksi 0,5 metriä paksu mineraalinen tiivistyskerros, jonka vedenläpäisevyyden tulee olla $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s. Kerroksen päälle asennetaan vähintään 2 mm paksu VFPE/PP-muovikalvo. Tiivistyskerroksen päälle rakennetaan kuivatuskerros, paksuudeltaan 0,5 metriä, sen päälle suodatinkerros ja pinnalle 0,3 metriä paksu kasvukerros. Maisemointiin käytetään istutuksia. Puita alueelle ei saa istuttaa, jotta juuret eivät vahingoita eristyskerroksia.

Pohjarakenteen teko ajoittuu kesälle 2007. Tiivistysrakenteen materiaalin ja stabilointiainemäärän varmistuessa tehdään vielä ratkaisevat laboratoriokokeet, esimerkiksi varmistetaan materiaalin riittävän pieni vedenläpäisevyys.

7.2 Lempolan saven laboratoriokoetulokset ja tulosten tarkastelu

7.2.1 Savinäytteet ja peruskäsittely

Teknillisen korkeakoulun Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorioon tuotiin savinäytteitä kolmesta eri kohteesta Lempolan liittymän läheisyydestä. Ensimmäiset näytteet otettiin 16.6.2006 savikerroksesta liittymän ramppisilmukan keskeltä. 21.6.2006 otetut näytteet olivat läheisen peltoalueen savikerroksesta. Tielinjalta kaivetusta ja läjitetystä savesta otettiin näytteet 29.8.2006. Kahdessa ensimmäisessä näyte-erässä oli useimmiten kaksi näytettä samalta pisteeltä; ensimmäinen lähempää pintaa, alkaen noin 0,5 metrin syvyydeltä, ja toinen syvemmältä, päättyen noin kolmeen metriin. Kolmannen erän näytteet otettiin saven läjityspaikalta, joten ne olivat valmiiksi häiriintyneitä. Näytteet, näytteenotto-syvyydet, luokitusominaisuudet ja arvioitu maalaji esitetään taulukossa 11.

Laboratoriotutkimusten tarkoituksena oli selvittää saven soveltuvuus sijoitusalueen pohjan mineraaliseksi tiivistyskerrokseksi. Päähuomio kiinnitettiin vedenläpäisevyyteen, on-

ko savirakenteen mahdollista täyttää vaatimus $k \leq 6,7 \times 10^{-10}$ m/s, sekä työstettävyyteen, jolloin selvitettiin, tarvitseeko saveen lisätä sideainetta lujuuden parantamiseksi. Lisäksi tutkittiin sideainelisäyksen vaikutusta savinäytteiden vedenläpäisevyyteen. Projektissa käytettäväksi sideaineeksi oli valittu Yleissementti.

Taulukko 11 Lempolan savinäytteiden luokitusominaisuudet ja arvioidut maalajit

näyte	syvyys	luokitusominaisuudet				maalaji rakeisuuden perusteella
		vesipit.	savipit.	humus	kiintotih.	
	[m]	%	%	%	t/m ³	
Ramppisilmukka, 16.6.2006						
KK1	1,0-2,0	39,3	52			liSa
KK1	2,0-3,0	47,3	53			liSa
KK2	0,5-1,0	15,3	17			saSi
KK2	1,0-1,5	25,1	30			saSi
KK4	2,5-3,0	71,4	59	1,94	2,78	liSa
KK6	2,0-2,5	37,7	53			liSa
KK6	2,5-3,0	39,4	57			liSa
KK7	2,8-3,2	41,4	55			liSa
Peltoalue, 21.6.2006						
KK1	0,5-1,0	43,9	58			liSa
KK1	1,0-2,3	49,3	65			liSa
KK2	0,5-1,5	39,7	62	1,11		liSa
KK2	1,5-2,4	55,3	58			liSa
KK3	0,4-1,2	36,3	61			liSa
KK3	1,2-2,6	42,2	62	0,81	2,72*	liSa
KK4	0,5-1,0	28,5	47			laSa
KK4	1,0-2,4	56,4	73			liSa
KK5	0,5-1,1	25,9	46	0,53	2,74	laSa
KK5	1,1-2,5	57,9	68			liSa
KK6	0,7-1,1	44,6	67			liSa
KK6	1,1-2,4	63,8	76			liSa
Läjitysalue, 29.8.2006						
läj. 1	-	39,6	40	0,00	2,76	laSa
läj. 2	-	73,5	71	0,94		liSa
läj. 3	-	84,9	74	0,62		liSa
läj. 4	-	59,2	50	0,18		laSa
läj. 5	-	67,9	72	0,79	2,79	liSa
läj. 6	-	63,2	66	0,58	2,79	liSa
läj. 7	-	37,2	33	0,00		laSa
läj. 8	-	74,7	71	1,58	2,77	liSa
läj. 9	-	53,0	52	0,37		liSa
läj. 10	-	47,2	46	0,00		laSa
läj. 11	-	54,0	57	0,28		liSa
läj. 12	-	64,1	72	0,78		liSa

* yhdistetty näytteet KK3 (0,4-1,2) ja KK3 (1,2-2,6) (21.6.)

Kaikille näytteille tehtiin rakeisuuskoe areometrillä. Ramppisilmukan keskeltä 16.6.2006 otetuista näytteistä kaksi oli savista silttiä; savipitoisuus eli 0,002 millimetriä pienempien rakeiden pitoisuus oli ≤ 30 %. Kaikki muut näytteet jokaisesta näyte-erästä olivat joko laihaa savea (savipitoisuus $> 30 \dots 50$ %) tai lihavaa savea (savipitoisuus > 50 %). Keskimäärin suurin savipitoisuus oli peltoalueelta otetuissa näytteissä; keskiarvo oli 62 ja keskihajonta 8,7 prosenttiyksikköä. Ramppisilmukan näytteiden vastaavat arvot olivat 47 ja 14 ja läjitysalueen keskiarvo 59 ja keskihajonta 14.

Näytteiden vesipitoisuus vaihteli välillä 15,3...84,9 %. Jos samalta pisteeltä oli otettu kaksi näytettä, syvemältä otetun näytteen vesipitoisuus oli suurempi. Läjitysalueelta 29.8.2006 otettujen näytteiden vesipitoisuuden keskiarvo on suurin, 59,9 %. Ramppisilmukasta ja pellolta otettujen näytteiden vesipitoisuuksien keskiarvot olivat 39,6 % ja 45,3 %, vastaavasti. Läjitetty savi sisältää mahdollisesti jonkin verran sadevettä.

Näytteiden humuspitoisuus oli pieni. Kaikissa testatuissa näytteissä humusta oli alle kaksi prosenttia, joten humuspitoisuus ei aiheuttanut lisänimiä maalajeille. Läjitysalueen näytteistä kaikista testattiin humuspitoisuus. Niistä ainoastaan yhdessä oli humusta yli yksi prosentti.

Mitatut kiintotiheydet olivat välillä 2,72...2,79 t/m³, mikä on tyypillistä kivennäismaalajeille.

Osasta näytteitä määritettiin myös häiritty leikkauslujuus sekä juoksuraja, taulukko 12. Kartiokokeella määritettiin häiritty leikkauslujuus sekä juoksuraja yksi- tai monipistemenetelmällä. Osalle näytteistä kokeiltiin juoksurajan määrittämistä myös Casagranden koputuskokeella, monipistemenetelmällä.

Taulukosta 12 nähdään, että useiden läjityksestä 29.8.2006 otettujen näytteiden vesipitoisuudet ylittivät juoksurajan tai ovat lähellä sitä. Sen sijaan ramppisilmukasta ja peltoalueelta otettujen testattujen näytteiden vesipitoisuudet jäivät juoksurajan alle. Häiritty leikkauslujuus oli varsinkin läjityksestä otetuilla näytteillä pieni, välillä 1...3 kPa. Pellolta otettujen näytteiden leikkauslujuus oli suurin, erityisesti KK5:n, jonka vesipitoisuus on 25,9 %. Tämä oli selvästi alhaisin vesipitoisuus testatussa näyteryhmässä.

Taulukko 12 Näytteiden leikkauslujuudet ja juoksurajat

näyte	vesi- pitoisuus (%)	häiritty leikkauslujuus, kartiokoe (kN/m ²)	juoksuraja (%)		
			kartiokoe		koputuskoe
			yksipiste- menetelmä	monipiste- menetelmä	monipiste- menetelmä
Ramppisilmukka, 16.6.2006					
KK4 (2,5-3,0)	71,4	2,16		75,5	83,5
Peltoalue, 21.6.2006					
KK2 (0,5-1,5)	39,7	104,9	82,4		
KK3 (0,4-2,6)*	42,1	22,7		62,0	71,5
KK5 (0,5-1,1)	25,9	196,1	55,9		
Läjitysalue, 29.8.2006					
läj. 1	39,6	2,65	42,8		
läj. 2	73,5	1,27	69,1		
läj. 3	84,9	~1	<75,6		
läj. 4	59,2	~1	<52,7		
läj. 5	67,9	2,26	71,3		
läj. 6	63,2	1,47	60,7		
läj. 7	37,2	1,77	37,2		
läj. 8	74,7	1,27	70,2		
läj. 9	53,0	1,47	50,9		
läj. 10	47,2	1,57	45,8		
läj. 11	54,0	2,75	58,9		
läj. 12	64,1	2,26	67,3		

* yhdistetty näytteet KK3 (0,4-1,2) ja KK3 (1,2-2,6) (21.6)

7.2.2 Vedenläpäisevyysödometri

Vedenläpäisevyyksiä tutkittiin ramppisilmukasta, peltoalueelta ja läjitysalueelta otetusta savesta. Peltoalueen savelle tehtiin läpäisevyyskokeita myös stabiloituna, lisäämällä sementtiä kolme tai viisi prosenttia saven kuivapainosta. Taulukossa 13 esitetään vedenläpäisevyyskokeiden tulokset. Vesipitoisuus w on mitattu suoraan ödometrikoekappaleesta punnitsemalla se ennen koetta ja kokeen jälkeen ja tuloksista on laskettu koekappaleen huokoisuus n_0 , huokosluku e_0 , kyllästysaste S_r sekä irtotiheys ρ_0 ja kuivairtitiheys ρ_{d0} kokeen alussa. Kokeen tuloksista on laskettu vedenläpäisevyys nollamuodonmuutoksella k_1 ja suhteellinen muodonmuutos-vedenläpäisevyyskuvaajan kulmakerroin puolilogaritmisella asteikolla β_k ($\log k = \log k_i - \beta_k \cdot \Delta \varepsilon$, jossa k_i on alkuperäinen vedenläpäisevyyskerroin). Lisäksi on laskettu vaadittava tiheys ρ_d , jolla saavutetaan vedenläpäisevyysvaatimus $k \leq 6,7 \times 10^{-10}$ m/s sekä vaadittava laskennallinen irtotiheys luonnonkosteana, ρ . Taulukossa näytteen nimen perässä merkintä s3 tarkoittaa, että näytteeseen on lisätty

kolme prosenttia sementtiä. Merkintä s5 tarkoittaa vastaavasti viiden prosentin sementtilisäystä. Vedenläpäisevyyskokeiden laboratoriokoenumerot ovat liitteenä 1.

Taulukko 13 Vedenläpäisevyysödometritulokset

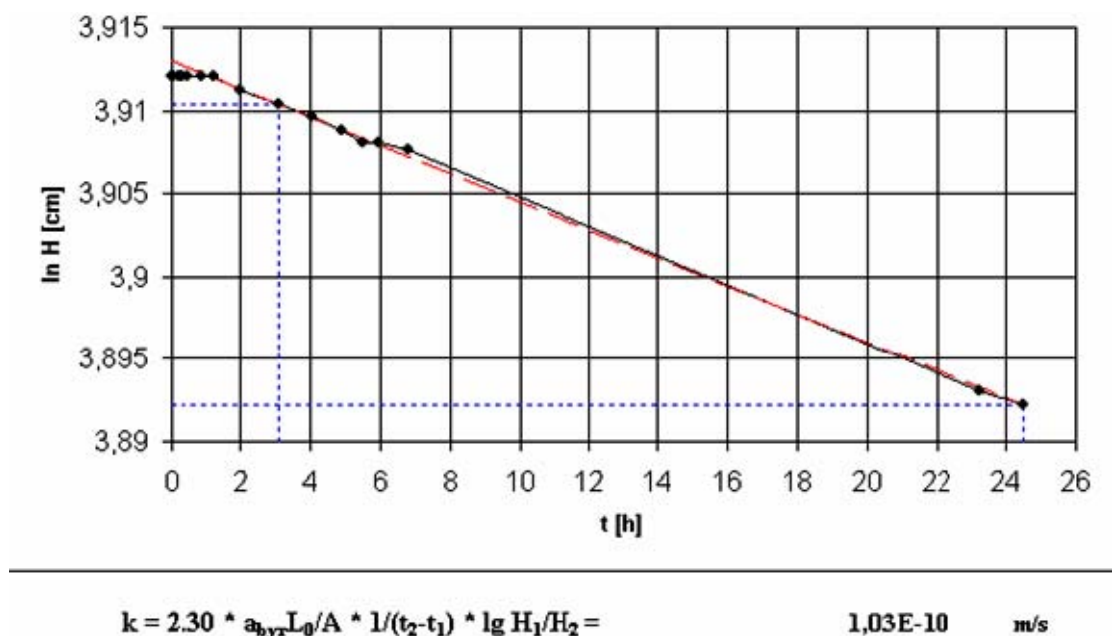
näyte	syvyys	vedenläpäisevyysödometritulokset									
		w	e ₀	n ₀	S _r	ρ ₀	ρ _{d0}	vaad.ρ _d	vaad. ρ	k ₁	β _k
	m	%	-	%	%	t/m ³	t/m ³	t/m ³	t/m ³	*10 ⁻⁹ m/s	-
Ramppisilmukka, 16.6.2006											
KK4	2,5-3,0	80,9	2,04	67	100	1,58	0,87	0,53	0,95	0,399	2,26
KK6	2,0-2,5	40,9	1,09	52	99	1,79	1,27	0,96	1,36	0,190	3,07
Peltoalue, 21.6.2006											
KK2	0,5-1,5	43,3	1,18	54	97	1,74	1,21	1,13	1,62	0,272	6,82
KK2	1,5-2,4	59,0	1,51	60	100	1,68	1,06	0,96	1,53	0,593	3,47
KK3	1,2-2,6	47,8	1,41	59	90	1,63	1,10	0,94	1,38	0,309	4,04
KK5	0,5-1,1	24,1	0,88	47	73	1,75	1,41	1,38	1,71	0,416	12,56
KK5	1,1-2,5	57,7	1,56	61	98	1,63	1,03	0,75	1,18	0,246	2,91
KK3*s3	0,4-2,6	42,0	1,06	51	100	1,83	1,29	-	-	0,269	5,76
KK3*s5	0,4-2,6	41,0	1,01	50	100	1,86	1,32	-	-	0,111	8,88
Läjitäysalue, 29.8.2006											
läj. 1	-	37,4	1,19	54	83	1,66	1,21	1,46	2,00	5,193	4,95
läj. 6	-	64,2	1,72	63	99	1,60	0,97	0,97	1,60	1,495	3,41
läj. 8	-	77,8	2,08	67	99	1,53	0,86	0,85	1,52	1,456	3,32

* yhdistetty näytteet KK3 (0,4-1,2) ja KK3 (1,2-2,6)

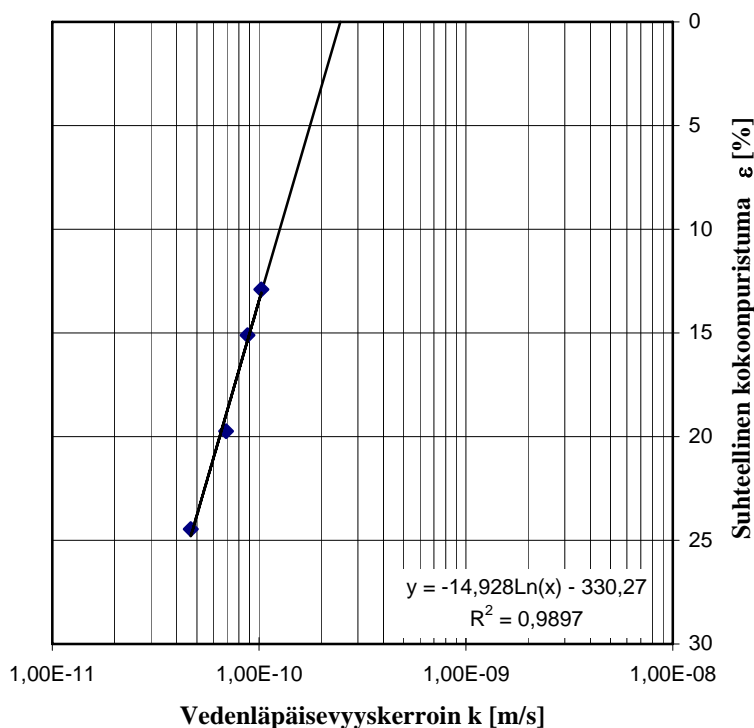
s3, s5 lisäty sementtiä kolme tai viisi prosenttia ja säilytetty viikko veden alla ennen kokeen aloittamista

Vedenläpäisevyyden laskemisessa on käytetty Excel-tilukkolaskentaohjelmaa. Kuvassa 34 esimerkkinä tulosten laskemisesta esitetään kuvaaja, jossa vaaka-akselilla on vedenläpäisevyyskokeen kesto aika ja pystyakselilla luonnollinen logaritmi vesipatsaan korkeudesta. Kuvan kaavalla on laskettu kuormitusportaan vedenläpäisevyyskerroin k. Esitetty kuormitusporras on 50 kPa ja testattu näyte peltoalueelta 21.6.2006 otettu KK5 (1,1-2,5 m).

Kuvassa 35 ovat näytteen KK5 (1,1-2,5) kaikkien neljän kuormitusportaan (50, 100, 200 ja 400 kPa) vedenläpäisevyyskerroin vs. suhteellinen kokoonpuristuma. Kuvasta nähdään, että kun muodonmuutos on 0 %, vedenläpäisevyyskerroin k₁ on likipitään 2,5 x 10⁻¹⁰ m/s – tulos on listattu taulukkoon 13. β_k on kuvaajan 35 kulmakerroin.



Kuva 34 Aika vs. luonnollinen logaritmi vesipatsaan korkeudesta kuormitusportaalla 50 kPa, näyte KK5 (1,1-2,5). Kuvan kaavalla on laskettu kuormitusportaan vedenläpäisevyyskerroin.



Kuva 35 Vedenläpäisevyyskerroin vs. suhteellinen kokoonpuristuma kuormitusportilla 50, 100, 200 ja 400 kPa, näyte KK5 (1,1-2,5)

Taulukosta 13 nähdään, että kaikki ramppisilmukasta ja peltoalueelta kesäkuussa otetut näytteet täyttävät vedenläpäisevyysvaatimuksen nollamuodonmuutoksella, eli niille pätee $k_1 \leq 6,7 \times 10^{-10}$ m/s.

Läjityksestä elokuussa otettujen näytteiden läj. 1, läj. 6 ja läj. 8 vedenläpäisevyydet nollamuodonmuutoksella olivat suuremmat kuin kesäkuussa otettujen näytteiden. Läj. 1:n vedenläpäisevyyskerroin oli erityisen suuri, $5,2 \times 10^{-9}$ m/s. Näytteen läj. 1 vesipitoisuus oli 37,4 %, kyllästysaste 83 % ja savipitoisuus 40 %, joka on vedenläpäisevyysnäyteryhmän pienin.

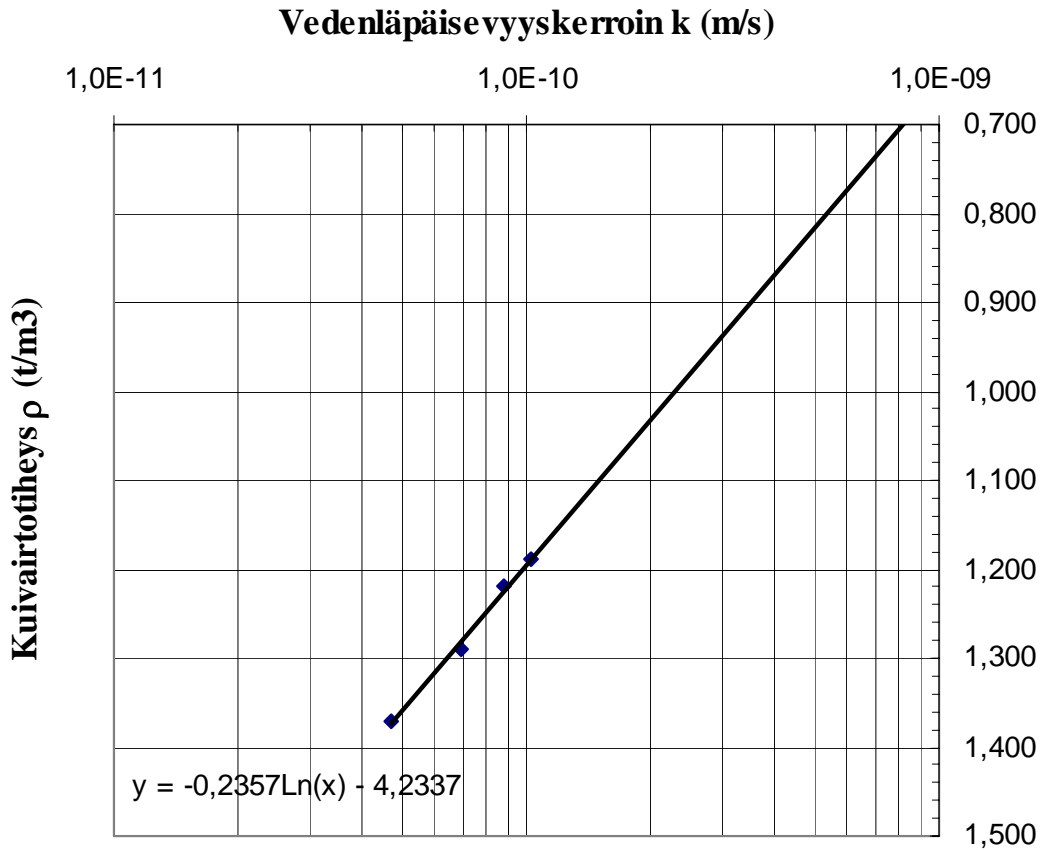
Läj. 6:n ja läj. 8:n vedenläpäisevyydet olivat $1,495 \times 10^{-9}$ m/s ja $1,456 \times 10^{-9}$ m/s. Näiden näytteiden vesipitoisuudet olivat suuret verrattuna kesäkuun näytteisiin, lukuun ottamatta näytettä KK4 (2,5-3,0). Läj. 6:n ja läj. 8:n tiheydet olivat koeryhmän pienimpiä, mutta savipitoisuudet suuria: 66 ja 71 %.

Peltoalueelta otetut näytteet KK3 (0,4-1,2) ja KK3 (1,2-2,6) yhdistettiin ja savimassaan lisättiin sementtiä kolme ja viisi prosenttia (KK3s3 ja KK3s5). Taulukosta 13 nähdään, että sementin vaikutuksesta vedenläpäisevyys pieneni verrattaessa stabiloimattoman näytteen KK3 (1,2-2,6) tulokseen. Erityisesti viidellä prosentilla sementtiä vedenläpäisevyyskerroin k_1 oli huomattavan pieni $1,1 \times 10^{-10}$ m/s. Stabiloituja näytteitä säilytettiin viikko veden alla ennen kokeen aloittamista, joten niiden kyllästysaste oli 100 %.

Kuivairtitiheys on helppo määrittää kenttäolosuhteissa. Siksi on laadittu vedenläpäisevyys-kuivairtitiheyskuvaaja, kuva 36, josta nähdään vedenläpäisevyystavoitteen $k \leq 6,7 \times 10^{-10}$ m/s saavuttamiseksi vaadittava kuivairtitiheys. Näytteelle KK5 (1,1-2,5) se on kuvaajalta lukien likipitään $0,75 \text{ t/m}^3$. Vaaditut kuivairtitiheydet on listattu taulukkoon 13.

Koska kaikkien ramppisilmukasta ja peltoalueelta otettujen näytteiden vedenläpäisevyys täyttää vaatimukset nollamuodonmuutoksella, vaadittu kuivairtitiheys, vaad. ρ_d , on pienempi kuin näytteen kuivatiheys ennen kokeen aloittamista, ρ_{d0} , ks. taulukko 13. Stabiloituille näytteille kuivairtitiheysvaatimusta ei voida määrittää samalla menetelmällä, koska stabiloidut näytteet lujittuvat sementin reaktioiden jatkuessa kokeen aikana. Stabi-

loitu savi on käytetyillä sideainemäärillä, ödometrirenkaaseen sullottuna joka tapauksessa riittävän tiivistä täyttääkseen vedenläpäisevyysvaatimuksen.

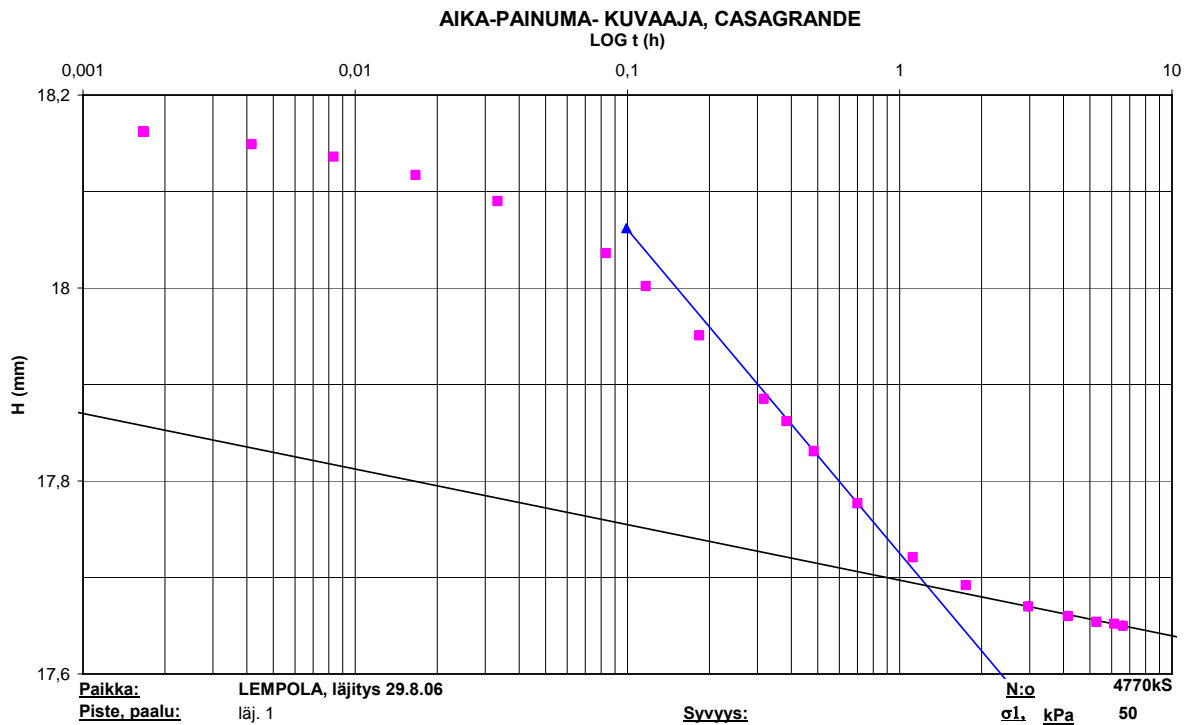


Kuva 36 Vedenläpäisevyyskerroin vs. kuivairtitiheys kuormitusportaita 50, 100, 200 ja 400 kPa, näyte KK5 (1,1-2,5)

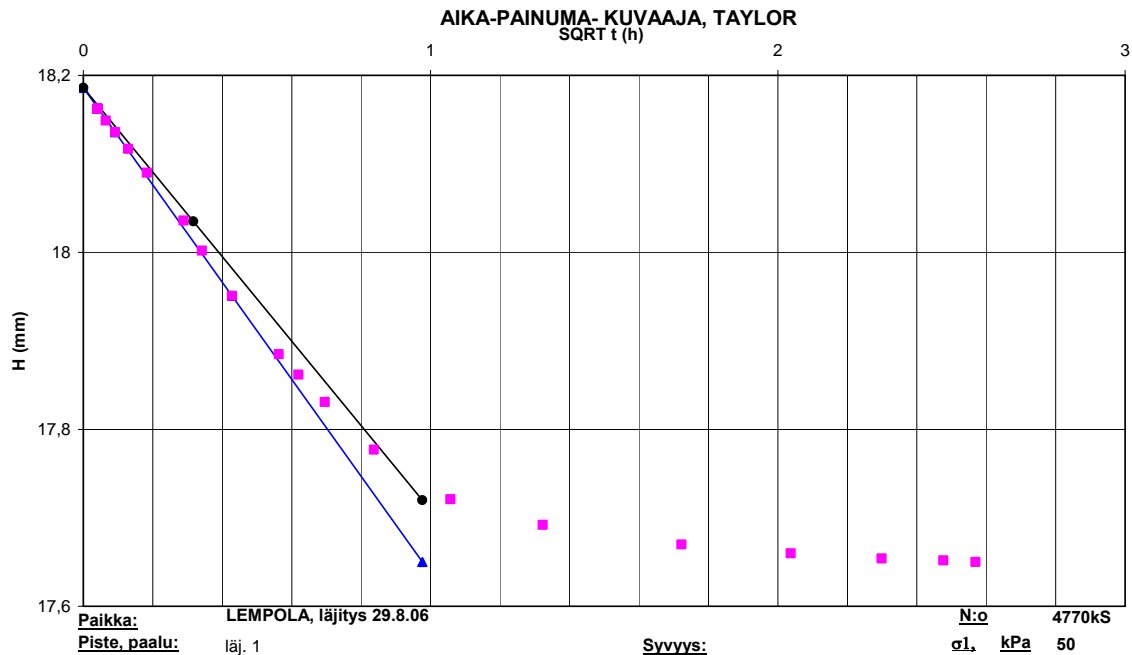
Näytteen läj. 1 tuloksista nähdään, että kun vedenläpäisevyyskerroin nollamuodonmuutoksella on suurempi kuin $6,7 \times 10^{-10}$ m/s, vaadittu ρ_d on alkutilanteen ρ_{d0} :ta suurempi. Myös läj. 6:n ja läj. 8:n vedenläpäisevyydet ovat tavoitearvoa suuremmat. Niissä kuitenkin läj. 6:lle vaadittu $\rho_d = 0,97$ ja alkutilanteen $\rho_{d0} = 0,97$ ja läj. 8:lle $\rho_d = 0,85$ ja $\rho_{d0} = 0,86$. Tämä johtuu trendiviivan sovituksen epätarkkuudesta Excel-ohjelmistossa – epätarkkuus tulee esiin näytteissä, joiden muodonmuutos jo pienillä kuormilla on suuri. Kuten yllä on mainittu, näytteiden läj. 6 ja läj. 8 vesipitoisuudet ovat korkeat ja irtotiheydet pienet. Muodonmuutokset ennen ensimmäistä vedenläpäisevyyskoetta olivat suuret, läj. 6:lle 25,0 % ja läj. 8:lle 24,6 %. Ensimmäinen vedenläpäisevyyskoetehtiin 50 kPa:n

kuormituksella, ja kokeessa molempien näytteen vedenläpäisevyyskertoimet olivat jo selkeästi pienemmät kuin $6,7 \times 10^{-10}$ m/s.

Osalle ödometrikokeista tehtiin aika-painumakuvaajat. Ne tehtiin jokaiselle kuormitus-portaalle 50 kPa:sta ylöspäin. Kuvassa 37 on näytteen läj. 1 Casagranden menetelmän mukainen aika-painumakuva kuormitusportaalla 50 kPa. Kuvassa 38 on saman näytteen ja saman kuormitusportaan Taylorin menetelmän mukainen kuvaaja.



Kuva 37 Casagranden mukainen aika-painumakuvaaja, läj. 1, 50 kPa

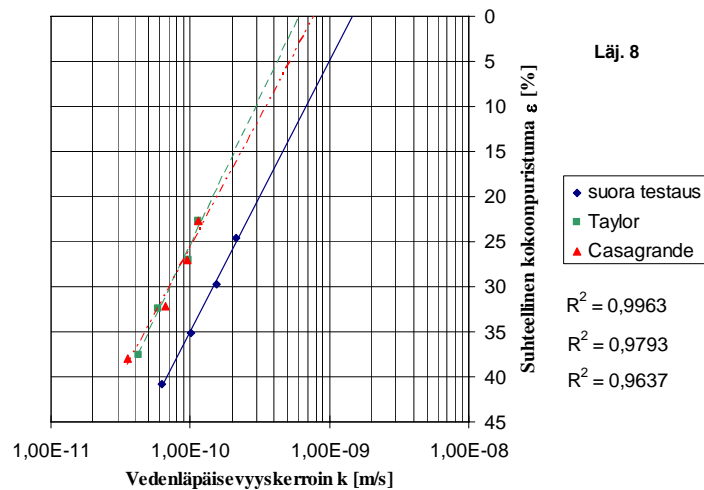
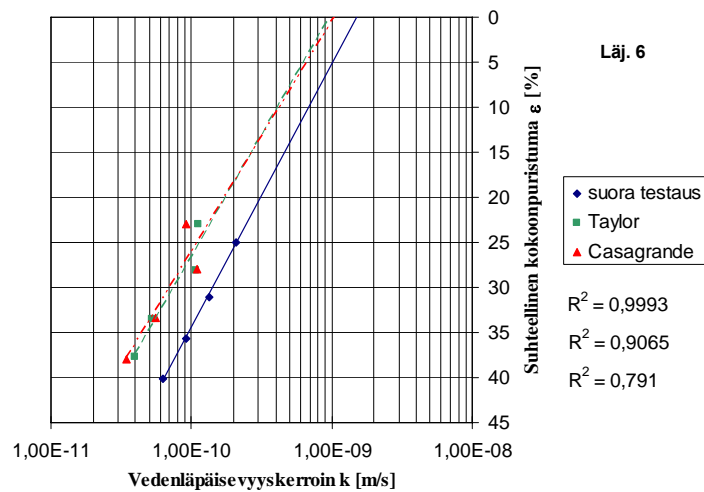
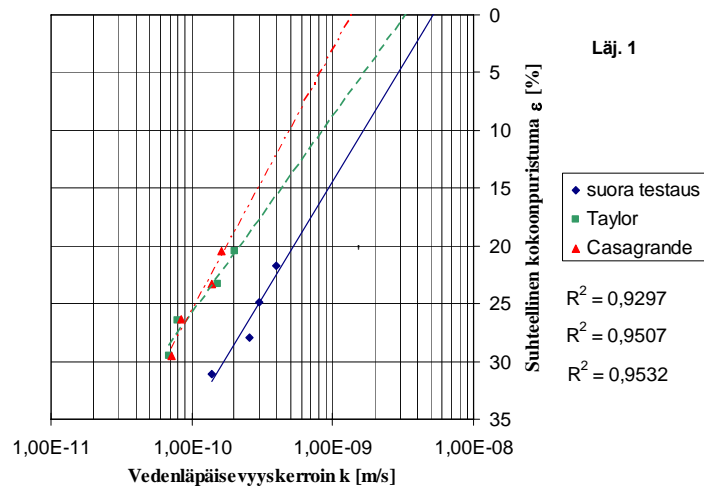


Kuva 38 Taylorin mukainen aika-painumakuvaaja, läj 1, 50 kPa

Laskennalliset vedenläpäisevyydet saatiin konsolidaatiokertoimen avulla. Konsolidaatiokerroin laskettiin sekä Casagranden että Taylorin menetelmällä jokaiselle kuormitusportaalille. Taulukossa 14 ovat läjityksen näytteille kokeissa saadut ja laskennallisesti selvitettyt vedenläpäisevyydet. Laskennalliset vedenläpäisevyydet ovat hieman pienemmät kuin vedenläpäisevyydometrikokeessa saadut tulokset, mutta suuruusluokka on sama. Kuvassa 39 esitetään läjityksen näytteille 1, 6 ja 8 tehtyjen vedenläpäisevyysskojeiden tulokset sekä laskennalliset vedenläpäisevyydet log k-ε-kuvaajissa.

Taulukko 14 Mitattu vedenläpäisevyys sekä Taylorin ja Casagranden menetelmillä lasketut vedenläpäisevyydet

näyte	vedenläpäisevyysskoe		Taylorin menetelmä		Casagranden menetelmä	
	k_1	β_k	k_1	β_k	k_1	β_k
	$\cdot 10^{-9} \text{ m/s}$	-	$\cdot 10^{-9} \text{ m/s}$	-	$\cdot 10^{-9} \text{ m/s}$	-
läj. 1	5,193	4,95	3,310	5,88	1,358	4,42
läj. 6	1,495	3,41	0,964	3,72	1,047	3,92
läj. 8	1,456	3,32	0,605	3,07	0,775	3,46



Kuva 39 Kokeissa mitatut ja laskennalliset vedenläpäisevyydet, läjityksen näytteille 1, 6 ja 8. R^2 -arvot ylhäältä järjestyksessä suora testaus, Taylor, Casagrande.

Kuvassa 39 näkyvät pisteiden kautta piirrettyjen trendiviivojen sovituksen R^2 -arvot. Sovitus on ajoittain huono, esimerkiksi läjitykselle 6 Casagranden menetelmällä laskettujen vedenläpäisevyyksien sovitus suoralle R^2 on 0,791. Ensimmäinen vedenläpäisevyyskoe on tehty 50 kPa:n kuormituksella. Ensimmäisen kuormitusportaan vedenläpäisevyyskokeella varmistetaan näytteen 100 %:n kyllästysaste. Lisäksi pienillä kuormitusportailla saattaa tapahtua jonkin verran vuotoa laitteistossa.

Lempolan saven vedenläpäisevyyskokeet on tehty vedenläpäisevyysödometreillä; menetelmä soveltuu hyvin savimateriaalille, on nopea ja vaatii vähän näytettä. Lisäksi vedenläpäisevyysödometrikokeesta saadaan tietoja näytteen painumaominaisuuksista. Clay Barriers -projektin puitteissa Lempolan savelle tullaan tekemään vedenläpäisevyyskokeita myös pehmeäseinämaisellä vedenläpäisylaitteella.

7.2.3 Yksiaksiaalinen puristuskoe

Yksiaksaaliset puristuskokeet tehtiin sementillä stabiloiduille koekappaleille. Peltoalueelta 21.6.2006 otetuista näytteistä yhdistettiin pisteeltä KK3 eri syvyyksiltä otetut näytteet, jotta saatiin tehtyä enemmän koekappaleita. KK3-näytettä stabiloitiin sementtimäärillä 30 kg/m^3 ja 50 kg/m^3 eli sementtiä oli noin kolme tai viisi prosenttia kuivamassasta.

Läjityksestä 29.8.2006 otetuista näytteistä kolmelle tehtiin lujuuskokeita. Näytteet olivat läj. 5, läj. 6 ja läj. 8. Niihin lisättiin sementtiä 30 kg/m^3 , noin 3 %. Koekappaleita tehtiin sekä standardikokoisia (halkaisija 50 mm, korkeus 100 mm) että pieniä (halkaisija 20 mm, korkeus 40 mm). Niitä säilytettiin joko kylmähuoneessa tai normaalissa huoneenlämmössä. Kappalemäärät, koot, lujittumisajat ja säilytyslämpötilat esitetään taulukoissa 15 ja 16. Taulukkoon on listattu myös astevuorokaudet, jotka lasketaan näytteen säilytysajan (d) ja säilytyslämpötilan ($^{\circ}\text{C}$) tulona. Rinnakkaisnäytteet on taulukoissa esitetty samalla rivillä.

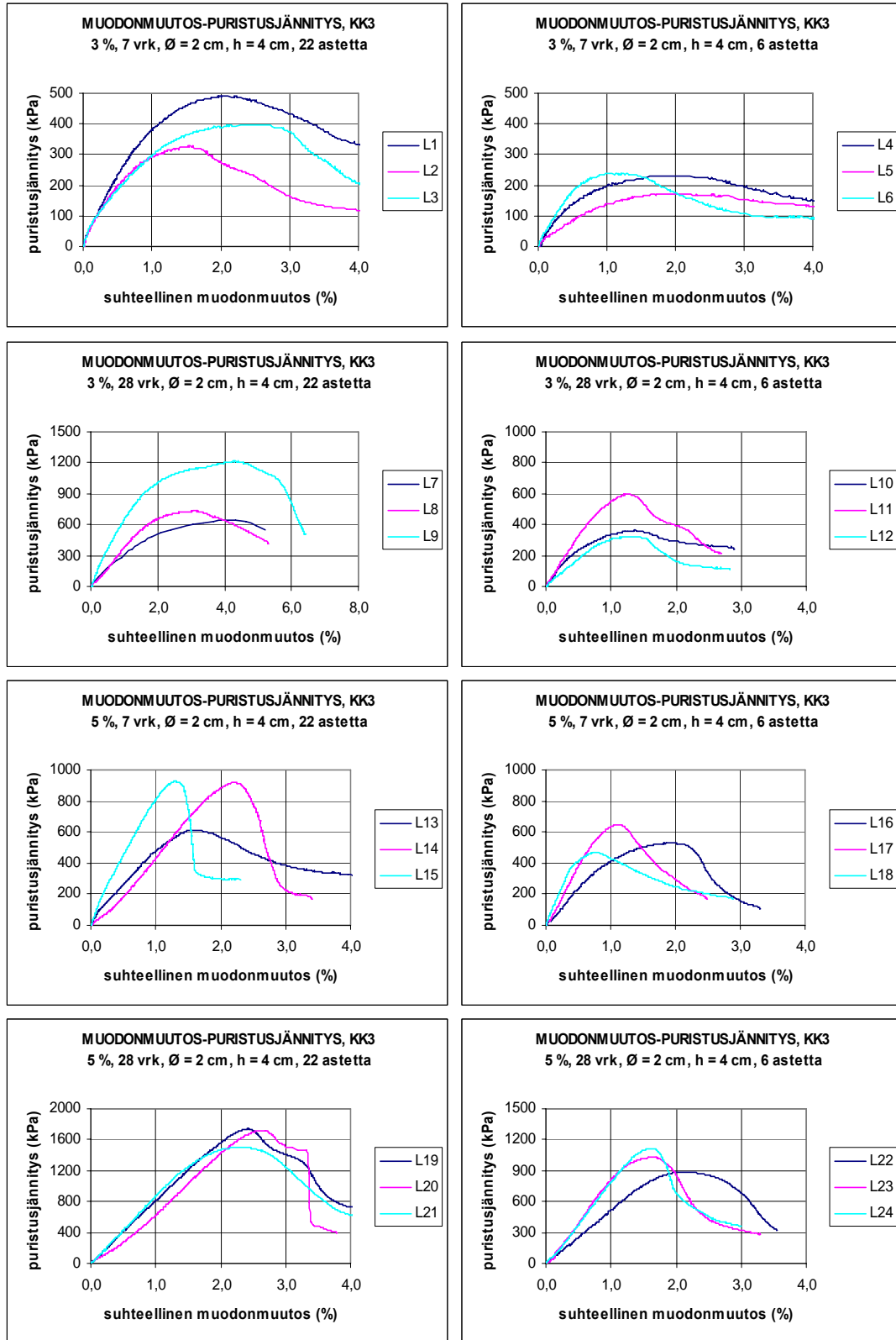
Taulukko 15 Peltoalueelta 21.6.2006 otetuista näytteistä (KK3) tehdyt puristuskoekappaleet

koekappaleet ja näyte	sementti (%)	koko (Ø/h) (mm/mm)	lujittumisaika (d)	lämpötila (°C)	astevrk:t (°Cd)
L1, L2, L3 (KK3)	3	20/40	7	22	154
L4, L5, L6 (KK3)	3	20/40	7	6	42
L7, L8, L9 (KK3)	3	20/40	28	22	616
L10, L11, L12 (KK3)	3	20/40	28	6	168
L13, L14, L15 (KK3)	5	20/40	7	22	154
L16, L17, L18 (KK3)	5	20/40	7	6	42
L19, L20, L21 (KK3)	5	20/40	28	22	616
L22, L23, L24 (KK3)	5	20/40	28	6	168

Taulukko 16 Läjitysalueelta 29.8.2006 otetuista näytteistä (läj. 5, läj. 6 ja läj. 8) tehdyt puristuskoekappaleet

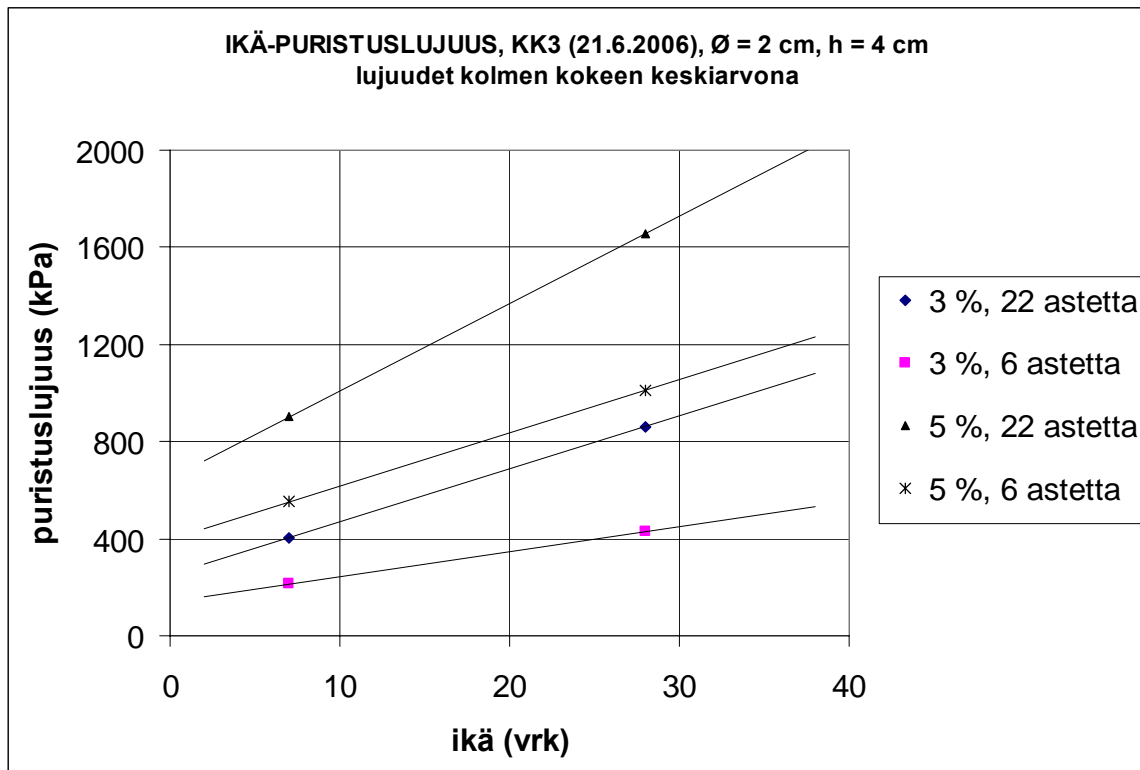
koekappaleet ja näyte	sementti (%)	koko (Ø/h) (mm/mm)	lujittumisaika (d)	lämpötila (°C)	astevrk:t (°Cd)
s1, s2, s3 (läj. 6)	3	50/100	7	6	42
s4, s5, s6 (läj. 6)	3	20/40	7	6	42
s7, s8, s9 (läj. 6)	3	20/40	28	6	168
s14, s15, s16 (läj. 5)	3	50/100	7	6	42
s17, s18, s19 (läj. 5)	3	20/40	7	6	42
s20, s21, s22 (läj. 5)	3	20/40	28	6	168
s27, s28, s29 (läj. 8)	3	50/100	7	6	42
s30, s31, s32 (läj. 8)	3	20/40	7	6	42
s33, s34, s35 (läj. 8)	3	20/40	28	6	168

Kuvassa 40 ovat peltoalueelta otettujen sekoitettujen näytteiden KK3 (0,4-1,2) ja KK3 (1,2-2,6) puristuskoetulokset ja kuvassa 42 läjityksestä otettujen näytteiden läj. 5, läj. 6 ja läj. 8 tulokset. Tulokset esitetään suhteellinen kokoonpuristuma-puristusjännityskuvaa-jissa, rinnakkaisnäytteet samassa kuvaajassa. Taulukot, joissa esitetään koekappaleiden puristuslujuudet, lasketut leikkauslujuudet, muodonmuutokset sekä vesipitoisuudet, tiheydet, kyllästysasteet, huokosluvut ja näytteiden astevuorokaudet ovat liitteinä 2 ja 3.



Kuva 40 Peltoalueelta otettujen näytteiden (KK3) muodonmuutos-puristusjännitys-kuvaajat

Kuvasta 40 nähdään, että suurempi sideainemäärä ja pidempi lujittuminen saivat yleisesti aikaan suuremman puristuslujuuden. Huoneenlämmössä säilytettyjen koekappaleiden lujuudet olivat suuremmat kuin kylmähuoneessa säilytettyjen. Lujuudet likipitään kaksinkertaistuivat säilytyslämpötilan vaihtuessa kuudesta 22 °C:een. Samanlainen vaikutus oli lujittumisajan pitenemisellä viikosta kuukauteen. Tulokset rinnakkaisnäytteiden keskiarvoina esitetään kuvassa 41, joka kertoo myös, että viidellä prosentilla sementtiä saavutettiin keskimäärin suurempi lujuus kuudessa kuin kolmella prosentilla 22 °C:ssa.

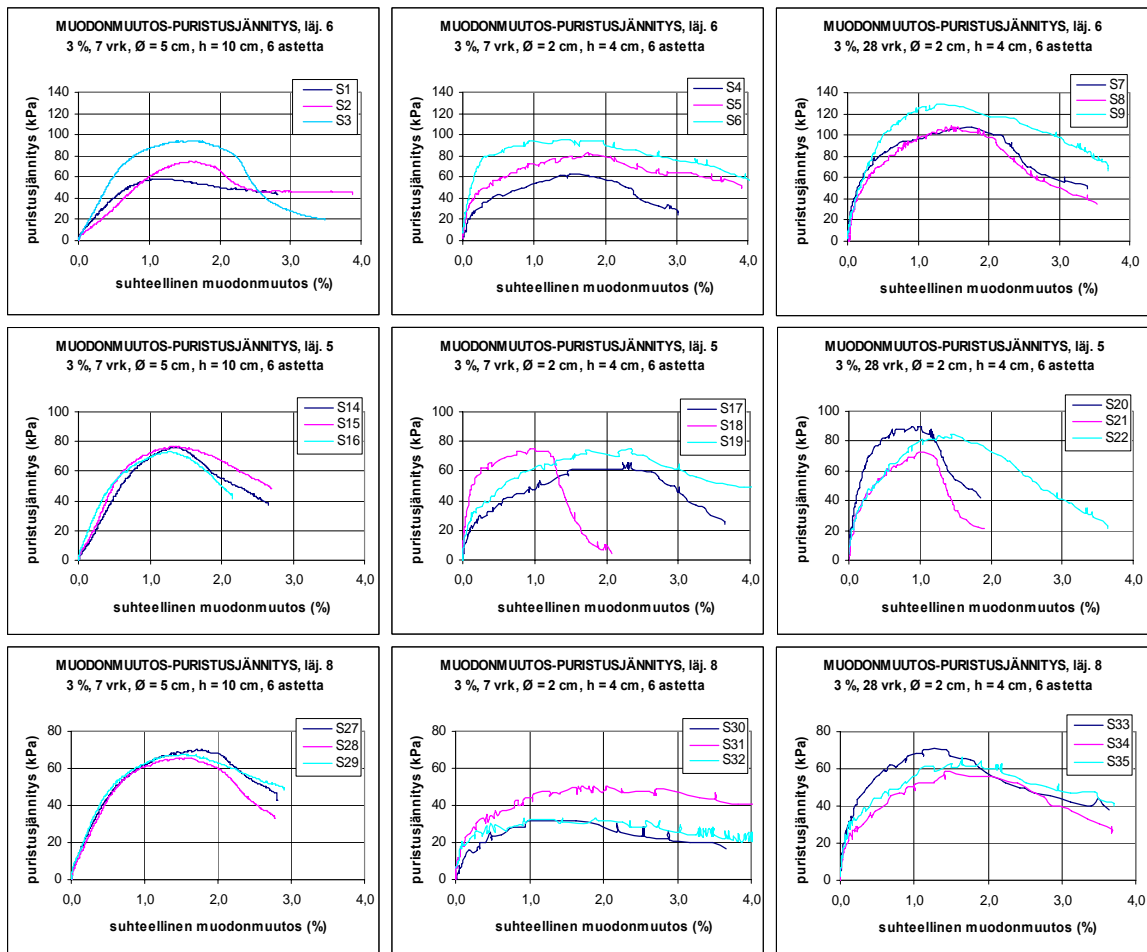


Kuva 41 Peltoalueen näytteiden (KK3) ikä vs. puristuslujuus, tulokset laskettu rinnakkaisnäytteiden keskiarvoina

Läjityksestä otettujen näytteiden tulosten avulla voidaan vertailla koekappaleen koon ja lujittumisajan vaikutusta puristuslujuuteen, kuva 42. Näytteistä läj. 6 ja läj. 5 tehtyjen standardikokoisten ja pienten koekappaleiden lujuudet olivat samaa tasoa. Näytteen läj. 8 standardikokoiset koekappaleet olivat lujempia kuin pienet. Niiden lujuudet olivat samaa luokkaa kuukauden lujittuneiden pienten koekappaleiden lujuuksien kanssa. Standardikokoisten näytteiden lujuuksien hajonta on vähäistä pieniin näytteisiin verrattuna sekä näyt-

teiden läj. 5 että läj. 8 koekappaleissa. Sen sijaan näytteen läj. 6 koekappaleiden lujuuksi-
en hajonta on suurempaa.

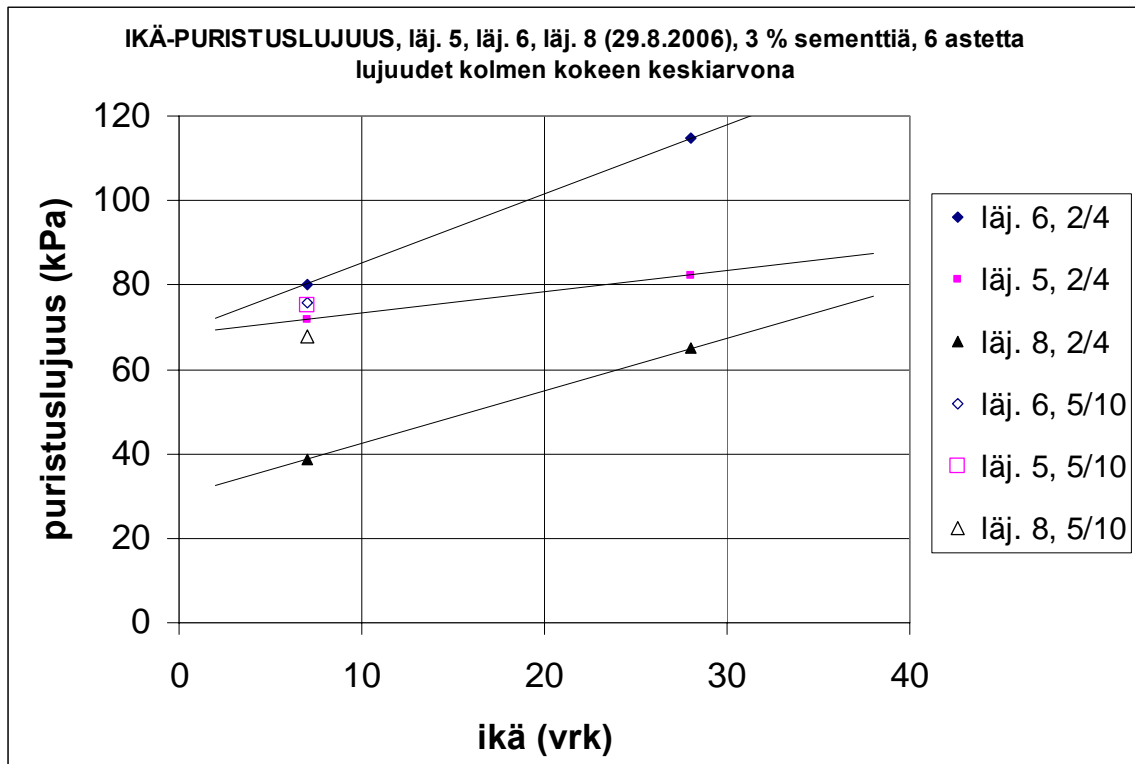
Läjituksesta otetuista näytteistä tehdyt koekappaleet säilytettiin kylmähuoneessa, toisesta
päästään veteen upotettuina. Isojen näytteiden päällä oli tiiliskivi estämässä koekappalei-
den paisumista. Näiden näytteiden kyllästysaste oli 96,4...100,0 %. Peltoalueen näytteistä
tehdyt koekappaleet säilytettiin joko kylmähuoneessa tai huoneenlämmössä. Ne eivät ol-
leet veteen upotettuina. Näiden koekappaleiden kyllästysaste oli 89,9...100,0 %. Kylläs-
tysasteet esitetään liitteissä 2 ja 3.



Kuva 42 Läjitysalueelta otettujen näytteiden (5, 6 ja 8) muodonmuutos-puristusjännitys-kuvaajat

Kuvaan 43 on koottu läjityksen koekappaleiden puristuskoe tulokset rinnakkaisnäytteiden
keskiarvoina. Näytteestä läj. 6 tehdyt koekappaleet saavuttavat keskimäärin suurimmat

lujuudet ja pienimmät lujuudet on näytteet läj. 8 koekappaleilla. Kaikista näytteistä tehtyjen isojen koekappaleiden lujuudet olivat keskimäärin samaa tasoa. Näyte-erien pienten koekappaleiden tuloksissa oli enemmän hajontaa. Läjityksen 5 koekappaleiden lujittuminen välillä 7...28 vuorokautta oli vähäistä verrattuna näytteiden läj. 6 ja läj. 8 koekappaleisiin.



Kuva 43 Läjityksestä otettujen näytteiden (5, 6, 8) ikä vs. puristuslujuus, tulokset laskettu rinnakkaisnäytteiden keskiarvoina

Koekappaleiden puristuslujuuksissa eli puristusjännityksen maksimiarvoissa esiintyy suurta hajontaa. Hajontaan vaikuttavat monet tekijät. Koekappaleen tekotapa ja tekijä vaikuttavat esimerkiksi siihen, kuinka tiiviisti savi sullotaan kehtoon ja kuinka kauan massa ehtii lujittua ja kuivua ennen kuin se pannaan näyteruiskuun tai pleksiputkeen. Myös se, millaista murtopintaa pitkin koekappale alkaa murtua, vaikuttaa puristuslujuuteen. Lisäksi koekappaleisiin saattaa jäädä ilmataskujen aiheuttamia koloja, jotka vaikuttavat puristuslujuuteen.

Peltoalueelta otettujen näytteiden rinnakkaiskoekappaleissa vesipitoisuuksien vaihtelu oli suurimmillaan 3,0 prosenttiyksikköä; L7:n vesipitoisuus oli 35,3 %, L8:n 36,1 % ja L9:n 33,1 %. Vaikka L9:n tiiviys ei ollut ryhmän suurin, se saavutti silti suurimman puristuslujuuden. Lisäksi erässä S19...S21 oli 1,7 prosenttiyksikön ero suurimman ja pienimmän vesipitoisuuden välillä, mutta pienimmän vesipitoisuuden omaavan näytteen (L20, 34,4 %) puristuslujuus ei ollut suurin. Muissa näyte-erissä vesipitoisuuden vaihtelu oli alle prosenttiyksikön. Koekappaleiden tiiviys vaihtelee rinnakkaisnäyte-erien sisällä jopa $0,164 \text{ t/m}^3$. Kokeet kuitenkin osoittavat, että tiivein koekappale ei useassa tapauksessa ole puristuslujuudeltaan suurin. Muut tekijät, kuten ilmataskujen aiheuttamat kolot lisäävät tulosten hajontaa ja sattumanvaraisuutta. Peltoalueen koekappaleet tehtiin usean henkilön voimin, joten rinnakkaiskoekappaleet saattavat olla eri henkilön valmistamat.

Läjityksen näytteiden koekappaleet ovat tasalaatuisia, rinnakkaiskoekappaleiden vesipitoisuus vaihtelee yhden prosenttiyksikön sisällä, lukuun ottamatta läj. 8:n rinnakkaiskoekappaleita, joiden vesipitoisuusero oli 1,3 prosenttiyksikköä; S30 (69,9 %) ja S32 (68,6 %). Läjityksen koekappaleissa tiheysvaihtelut rinnakkaiskoekappaleiden välillä ovat pieniä; suurin ero maksimi- ja minimitiheyksien välillä oli $0,022 \text{ t/m}^3$, läj. 6:n koekappaleiden S1 ($1,613 \text{ t/m}^3$) ja S3 ($1,635 \text{ t/m}^3$) välillä. Kuvasta 44 nähdään, että S3:n saavuttama lujuus on rinnakkaiskoekappaleista suurin. Likipitäen $0,020 \text{ t/m}^3$ suuret tiheys-erot oli myös näyte-erissä S4...S6, S17...S19 ja S27...S29. Kuitenkin ainoastaan erässä S4...S6 koekappale, jolla oli suurin tiheys, oli myös puristuslujuudeltaan suurin. Taulukot tiheyksistä ja vesipitoisuuksista ovat liitteinä 2 ja 3. Läjityksen näytteistä tehdyt koekappaleet tehtiin siten, että sama henkilö valmisti kaikki rinnakkaisnäytteet.

Murtumisen jälkeinen käyttäytyminen riippuu siitä, millainen murtopinta koekappaleeseen syntyy. Rinnakkaisnäytteiden välillä on havaittavissa eroavaisuuksia murtumisen jälkeisessä käyttäytymisessä, kuvat 42 ja 44. Esimerkiksi näytteen läj. 6 standardikokoisten koekappaleiden tulosten hajonta on selvästi suurempi kuin muiden läjityksestä tehtyjen standardikoekappaleiden. Syynä on mahdollisesti se, että standardikokoiset koekappaleet tehtiin uudella menetelmällä ensimmäisenä näytteestä läj. 6, joten koekappaleiden tekijällä ei vielä ollut kokemusta ja vakiintunutta käytäntöä kappaleiden teossa. Näin

koekappaleista ei tullut tasalaatuisia, minkä osoittaa kuva 44, jossa esitetään puristetut näytteet kuivaamisen jälkeen. Kuvasta käy ilmi myös murtopintojen erilaisuus.



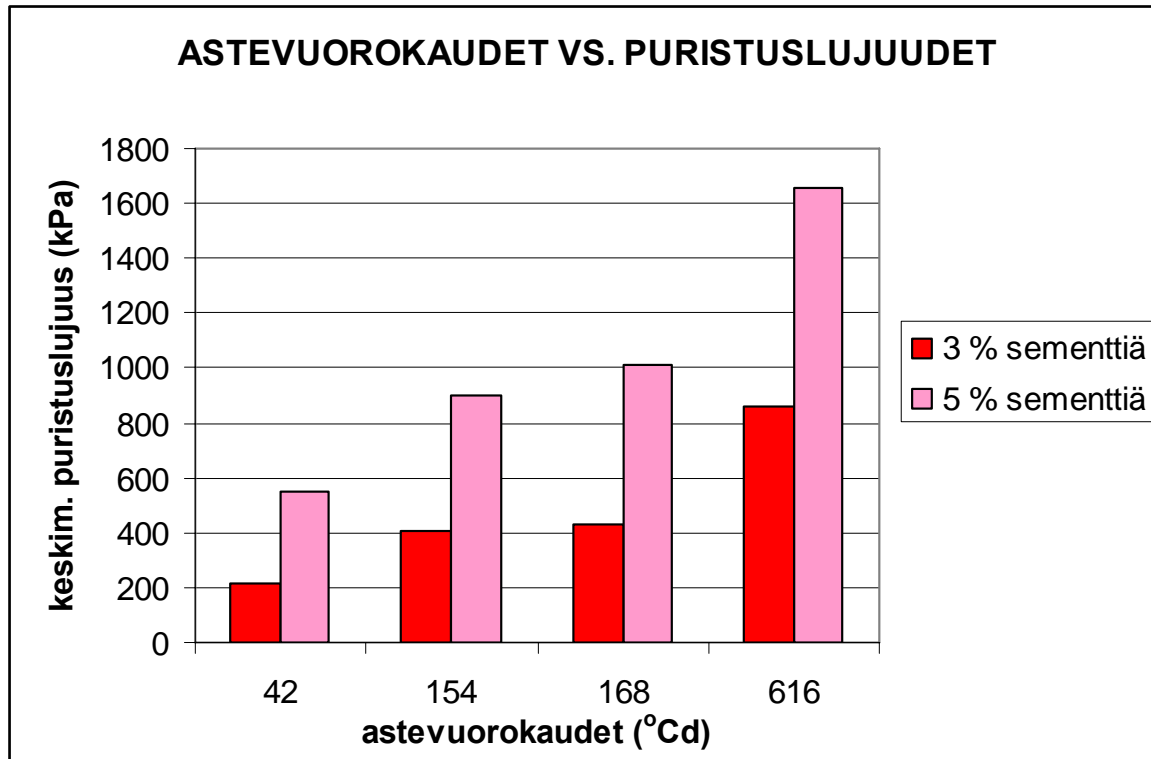
Kuva 44 Näytteestä läj. 6 tehdyt standardikokoiset puristetut koekappaleet kuivaamisen jälkeen

Näytteestä läj. 8 tehtyjen koekappaleiden heikko lujuus saattaa johtua näytteen sisältämästä humuksesta. Näytteessä on humusta 1,58 %. Muissa näytteissä, joista tehtiin puristuskoekappaleita, oli humusta alle yksi prosentti: läj. 5:ssä 0,79 %, läj. 6:ssä 0,58 %. Peltoalueelta eri syvyyksiltä otetuista KK3-näytteistä ainoastaan toisesta, syvyydeltä 1,2...2,6 metriä otetusta näytteestä selvitettiin humuspitoisuus, joka oli 0,81.

Taulukoihin 15 ja 16 listattujen astevuorokausien sekä puristuslujuuksien yhteyttä voidaan tarkastella kuvien 45 ja 46 avulla. Kuvassa 45 esitetään peltoalueelta otettujen stabiloitujen KK3-näytteiden astevuorokaudet ja puristuslujuuksien keskiarvot kolmesta rinnakkaisnäytteestä. Kuvassa ovat sekä kolme että viisi prosenttia sementtiä sisältävät näytteet.

Kun astevuorokaudet ovat likipitään samat, $7 \text{ d} * 22 \text{ °C} = 154 \text{ °Cd}$ ja $28 \text{ d} * 6 \text{ °C} = 168 \text{ °Cd}$, myös puristuslujuudet ovat samaa tasoa. Tämä pätee sekä kolmen että viiden pro-

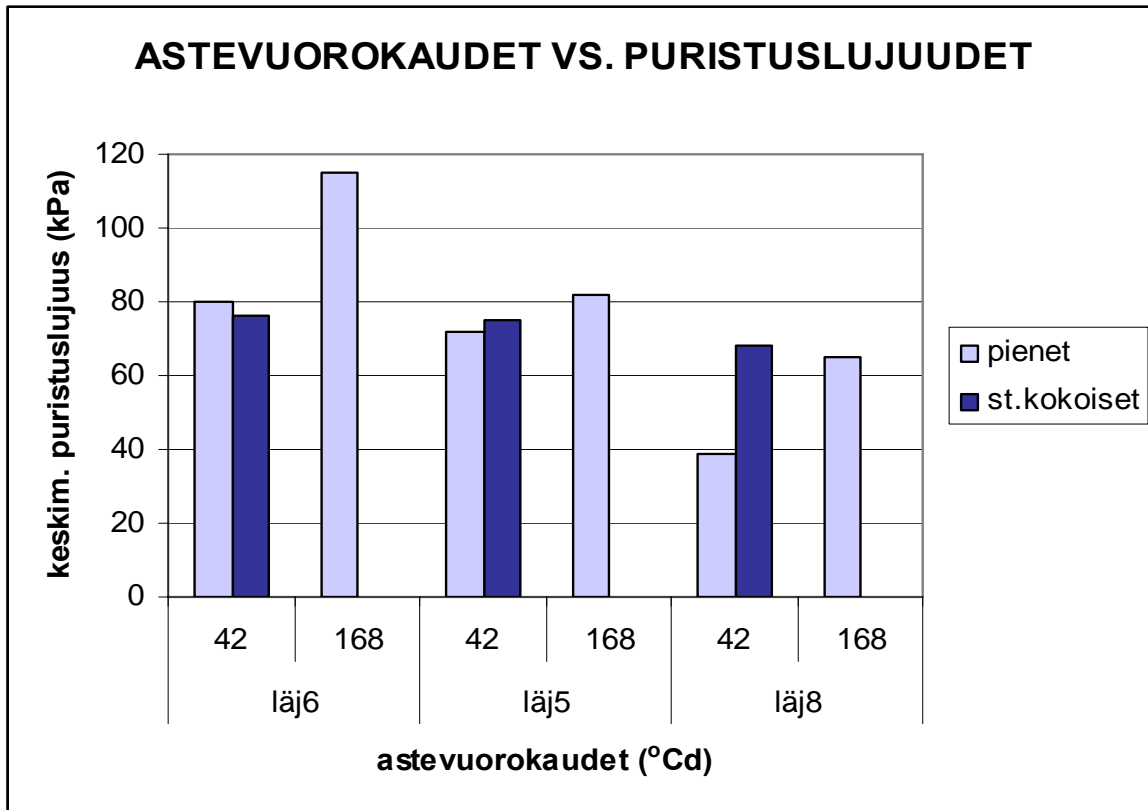
sentin sementtilisäyksille. Kolmella prosentilla sementtiä tulosten keskiarvoista on selvästi havaittavissa, että kun astevuorokausien määrä nelinkertaistuu, puristuslujuus likipitään kaksinkertaistuu. Viiden prosentin sementtilisäyksellä astevuorokausien nelinkertaistuksessa lujuus kasvaa noin 1,7-...1,8-kertaiseksi.



Kuva 45 Astevuorokaudet ja keskimääräiset puristuslujuudet peltoalueen KK3-näytteistä

Kuvassa 46 ovat läjityksestä otettujen näytteiden 6, 5 ja 8 astepäivät ja keskimääräiset puristuslujuudet kolmen näytteen keskiarvona. Pienille näytteille on tehty sekä 42 °Cd:n että 168 °Cd:n kokeet, standardikokoisille näytteille ainoastaan 42 °Cd:n kokeet. Kaikkiin näytteisiin lisättiin 3 % sementtiä. Läjityksestä otettujen näytteiden tuloksissa ei ole havaittavissa samanlaista yhteyttä astevuorokausien ja puristuslujuuksien välillä kuin peltoalueen KK3-näytteillä. Diagrammista nähdään, että kaikkien standardikokoisten koekappaleiden keskimääräinen puristuslujuus oli likipitään sama riippumatta, mistä näytteestä ne oli tehty. Isojen ja pienten näytteiden keskimääräiset puristuslujuudet olivat samalla astevuorokausimäärällä likipitään yhtä suuret läjitysten 5 ja 6 koekappaleille. Sen sijaan näytteen läj. 8 pienet koekappaleet olivat selvästi heikompia kuin isot. Ainoastaan näyt-

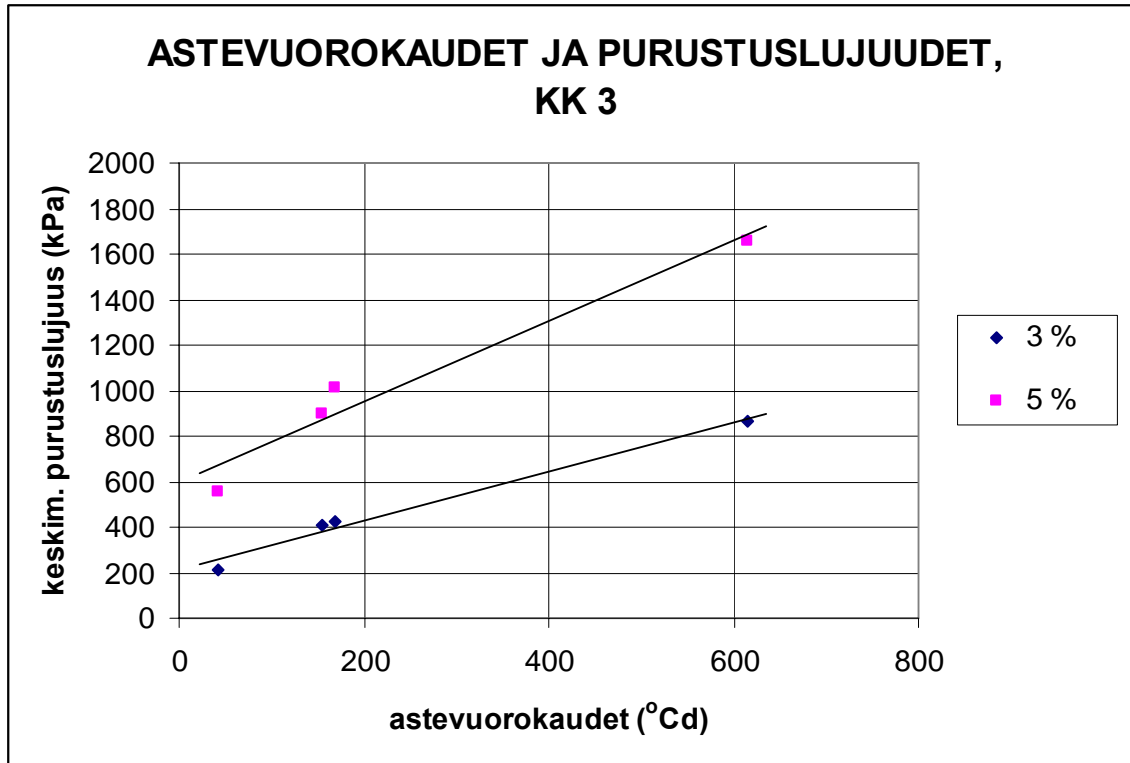
teen läj. 6 koekappaleissa on tapahtunut selkeää lujittumista, kun astevuorokausien määrä on nelinkertaistunut.



Kuva 46 Astevuorokaudet ja keskimääräiset puristuslujuudet läjitysalueen näytteistä 6, 5 ja 8

Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että näytteille KK3 astevuorokausi-lujuusriippuvuus (ks. kappale 6.3.4) on tarkasteltavalla astevuorokausialueella likipitäen lineaarinen, kuva 47. Näin vähäisen koemäärän perusteella ei kuitenkaan voida päätellä kuvaajan muotoa, vaan se jää selvitettäväksi tulevilla tutkimuksilla.

Läjityksen ja peltoalueen näytteiden käyttäytymistä verrattaessa on huomattava läjityksen näytteiden huomattavasti peltoalueen näytteitä suurempi vesipitoisuus, jonka vuoksi sekoitetun massa vesi-sementtisuhde muodostui suuremmaksi kuin peltoalueen näytteillä. Sekä läjityksen että peltoalueen astevuorokausitiedot ovat liitteissä 2 ja 3.



Kuva 47 Astevuorokausien ja keskimääräisen puristuslujuuden välinen riippuvuus näytteen KK3 koekappaleille

7.2.4 Proctor-koe

Osalle ramppisilmukasta ja peltoalueelta otetuista näytteistä tehtiin Standard Proctor -koeket, joiden tulokset esitetään taulukossa 17. Kokeet tehtiin luonnontilaisessa vesipitoisuudessa. Peltoalueen näytteistä yhdistettyyn näytteeseen, KK2 (0,5-1,5), KK2 (1,5-2,4), KK3 (0,4-1,2) ja KK3 (1,2-2,6), lisättiin 30 kg/m^3 sementtiä eli lisäys oli noin kolme prosenttia kuivapainosta.

Koetulokset esitetään kuvaajassa, kuva 48. Kuvaajasta nähdään tiheyksien sijoittuvan kuivatiheyden kyllästysrajan tuntumaan, kun kiintotiheydeksi oletetaan $2,70 \text{ t/m}^3$. Kuivimman näytteen KK5 (0,5-1,1), jonka vesipitoisuus on 27,0 %, tiheys jää selkeästi alle kyllästysrajan. Muiden näytteiden vesipitoisuus oli yli 40 % ja niiden tulokset ovat kyllästysrajan tuntumassa. Taulukosta 13 nähdään, että kuivimman näytteen kyllästysaste on vedenläpäisevyysödometrikokeessa ollut ainoastaan 73 %. Muiden Proctor-näytteiden kyllästysaste oli vähintään 90 %.

Yhdistetyn näytteen vesipitoisuus ennen sementin lisäämistä oli 43,0 %. Heti sideaineen lisäämisen ja sekoittamisen jälkeen vesipitoisuus oli 40,4 %. Standard Proctor -koe tehtiin heti sementin sekoittamisen jälkeen, joten lujittumisaika oli ainoastaan muutamia minuutteja. Sementillä stabiloitu näyte sijoittuu samaan linjaa muiden Proctor-tulosten kanssa.

Taulukko 17 Ramppisilmukan ja peltoalueen näytteiden Standard Proctor -koetulokset sekä vedenläpäisevyysödometrikokeiden vastaavat arvot

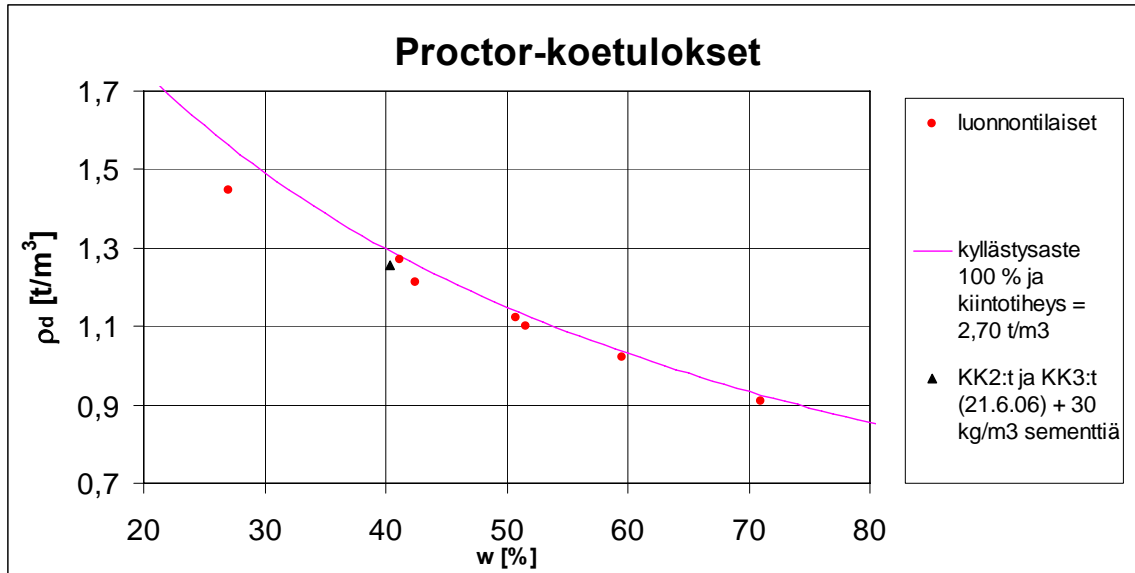
näyte	syvyys	Proctor-koe		ved.läp.ödometri	
		ρ_d	w	ρ_{d0}	w
	m	g/cm ³	%	g/cm ³	%
KK4*	2,5-3,0	0,91	71,0	0,87	80,9
KK6*	2,0-2,5	1,27	41,2	1,27	40,9
KK2	0,5-1,5	1,21	42,4	1,21	43,3
KK2	1,5-2,4	1,10	51,6	1,06	59,0
KK3	1,2-2,6	1,12	50,8	1,10	47,8
KK5	0,5-1,1	1,45	27,0	1,41	24,1
KK5	1,1-2,5	1,02	59,5	1,03	57,7
KK2t, KK3t**	-	1,25	40,4	-	-

* näytteet ramppisilmukasta, muut peltoalueelta

** yhdistetty KK2 (0,5-1,5), KK2 (1,5-2,4), KK3 (0,4-1,2) ja KK3 (1,2-2,6), lisätty n. 30 kg/m³ Yleissementtiä

Kaikkiaan näytteiden sijoittuminen samaan linjaan osoittaa niiden olevan samantyyppisestä savikerroksesta. Vaikka näytteet on otettu eri paikoista ja niiden vesipitoisuus vaihtelee, savimateriaali käyttäytyy kuin kyseessä olisi sama savi eri vesipitoisuuksilla.

Proctor-kokeen kuivairtoteiheydet ovat likipitään samat kuin vedenläpäisevyysödometrikoekappaleista lasketut kuivairtoteiheydet, taulukko 17. Kuivairtoteiheyksien erot ovat suurimmat niiden näytteiden kohdalla, joiden vesipitoisuus ödometrikokeessa poikkeaa merkittävästi Proctor-kokeesta mitatusta vesipitoisuudesta, esimerkiksi KK4 (2,5-3,0) ja KK2 (1,5-2,4). Erot vesipitoisuuksissa johtuvat todennäköisesti näytteiden puutteellisesta sekoittamisesta – näyte ei ole ollut täysin homogeeninen.



Kuva 48 Proctor-kokeiden tulokset ja kyllästysraja

8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Kun pyritään käyttämään teollisuuden sivutuotteita stabiloinnin lisä- tai täyteaineina, tarkoituksena on vähentää kaatopaikalle läjitettävän jätteen määrää ja pienentää sideainekustannuksia. On kuitenkin huomioitava, että tarvittavat massa- ja sideainemäärät ovat monessa käyttökohteessa, esimerkiksi kaatopaikkojen tiivistysrakenteissa, usein niin pienet, että sivutuotteiden käyttö ei tuo suurta hyötyä. Sivutuotteiden hyödyntäminen kannattaa erityisesti, jos sideainetta käytetään paljon ja materiaalia on saatavilla helposti. Suuria määriä sideainetta voidaan käyttää esimerkiksi meluvalleissa ja täytöissä.

Sementtiä ja kalkkia sideaineina on tutkittu eniten, ne ovat tasalaatuisia ja niiden hyödyntämiseksi on kehitetty toimivat menetelmät. Näin ollen sementti tai kalkki on helpoin valita sideaineeksi. Sivutuotteita käytettäessä on lisäksi huomioitava materiaalien ympäristökelpoisuus. Kuitenkin, mikäli käytettävä sideainemäärä on suuri ja halutaan vähentää sideainekustannuksia, jotka muodostavat suuren osan stabilointikustannuksista, sivutuotteen käyttöä kannattaa harkita, erityisesti, jos lähialueella on saatavilla tasalaatuista materiaalia.

Viimeisimmissä tutkimuksissa on havaittu erityisesti sementtistabiloinnin pienentävän pitkällä aikavälillä maa-aineksen vedenläpäisevyyttä, tosin alussa vedenläpäisevyys saattaa kasvaa ioninvaihdosta johtuvan kokkaroitumisen seurauksena. Vedenläpäisevyyden on havaittu pienenevän lujittumisen edetessä, kun maassa olevien reaktiotuotteiden määrä kasvaa ja maan huokoisuus vähenee. Sideaineen vaikutus vedenläpäisevyyteen riippuu sideaineen reaktionopeudesta ja sideainemäärästä. Lempolan saven tutkimuksissa havaittiin vedenläpäisevyyden pienentyvän sementtipitoisuuden kasvaessa kolmesta viiteen prosenttiin.

Stabiloidusta savesta on tehty tiivistysrakenteita, teiden rakennekerroksia sekä täyttöjä. Diplomityössä esitellyissä hankkeissa on kokeiltu massastabilointia, joka on eri hankkeissa toteutettu eri tavoin: erityisesti massastabilointiin tarkoitetuilla kaivukoneeseen kiinnitettävillä sekoitinkärjillä, pilaristabilointilaitteistolla tai kaivinkoneen kauhalla. Yhdessä

kohteessa testattiin massa- ja pilaristabiloinnin yhdistämistä. Kohteista saadut kokemukset olivat hyviä ja rakenteet toimivat pääosin suunnitellulla tavalla.

Laboratoriossa testatuista Lempolan savista peltoalueelta ja ramppisilmukasta kesäkuussa otetut näytteet olivat kuivempia kuin elokuussa läjitysalueelta otetut savinäytteet. Osaa kesäkuun näytteistä oli vaikea sekoittaa poran sekoitusterällä niiden kovuuden vuoksi. Läjityksen näytteistä suurin osa oli helposti sekoitettavia ja niiden vesipitoisuus oli suurempi. Läjityksestä otettu savi oli jo valmiiksi häiriintynyttä.

Peltoalueelta otetusta savinäytteestä tehtiin koekappaleita, jotka stabiloitiin kolmella ja viidellä prosentilla sementtiä. Näytteen vesipitoisuus oli alun perin noin 45 % ja sementtilisäyksen ja koestuksen jälkeen likipitään välillä 35...40 %. Koekappaleiden puristuslujuudet testattiin yksiaksiaalisessa puristuskokeessa. Seitsemän vuorokauden leikkauslujuudet, joiksi oletettiin puolet puristuslujuudesta, olivat kolmella prosentilla stabiloiduille näytteille luokkaa 100...200 kPa. Kuudessa celsiusasteessa säilytettyjen näytteiden lujuudet olivat vaihteluvälin alapäässä ja 22 °C:ssa säilytettyjen puolestaan välin yläpäässä. Samalla sementtimäärällä stabiloidut, 28 vuorokautta lujittuneet näytteet saavuttivat kuudessa celsiusasteessa keskimäärin 200 kPa:n leikkauslujuuden ja huoneenlämmössä yli 300 kPa:n leikkauslujuuden. Viiden prosentin sementtilisäyksellä saavutetut keskimääräiset lujuudet olivat vähintään kaksinkertaiset kolmen sementtiprosentin lisäykseen verrattuna.

Läjityksen näytteiden 5, 6 ja 8 alkuperäiset vesipitoisuudet olivat 68, 63 ja 75 %. Kaikkiin lisättiin kolme prosenttia sementtiä, jonka jälkeen vesipitoisuus laski kolmesta neljään prosenttiyksikköä. Näytteet säilytettiin kylmähuoneessa kuuden celsiusasteen lämpötilassa ennen koestamista. Seitsemän vuorokauden leikkauslujuudet olivat sekä standardikokoisilla että pienillä koekappaleilla likipitään välillä 30...50 kPa. Ainoastaan näytteen läj. 8, jonka vesipitoisuus on selvästi näytejoukon suurin, lujuudet pienillä koekappaleilla jäivät alle 30 kPa:n. 28 vuorokauden puristuskokeissa käytettiin vain pieniä koekappaleita. Leikkauslujuudet olivat suurimmalla osalla näytteistä välillä 40...60 kPa, mutta läj. 8:lle arvot jäivät 30 kPa:n tuntumaan. Näytteen läj. 6 vesipitoisuus oli pienin läjityksen

puristuskoenäytteistä ja sen saavuttamat lujuudet läjityksen näyteryhmän suurimmat. Vastaavasti läj. 8:n lujuudet olivat pienimmät ja vesipitoisuus suurin.

Tiivistysrakenteille tavoiteltu 50 kPa:n leikkauslujuus saavutetaan peltoalueen näytteen osalta helposti seitsemässä vuorokaudessa kolmen prosentoin sementtilisäyksellä. Läjityksen näytteestä 6 tehdyt koekappaleet saavuttivat noin 50 kPa:n lujuudet 28 vuorokauden iässä ja läj. 5:n lujuudet olivat 40 kPa:n luokkaa.

Peltoalueen yhdistetyn KK3-näytteen häiritty leikkauslujuus ilman sementtilisäystä oli $22,7 \text{ kN/m}^2$. Seitsemän vuorokauden leikkauslujuudet kolmella prosentilla sementtiä stabiloiduille koekappaleille olivat luokkaa $100 \dots 200 \text{ kN/m}^2$, eli lujuudet kasvoivat noin 5-...10-kertaisiksi. Läjitysalueen näytteiden häiritty leikkauslujuus ennen sementin lisäämistä oli keskimäärin noin 2 kN/m^2 , joten kun stabiloitujen näytteiden seitsemän vuorokauden leikkauslujuudet olivat $20 \dots 50 \text{ kN/m}^2$, lujuus oli kasvanut noin 10-...25-kertaiseksi.

Puristuskoeleikkipaleille laskettiin astevuorokaudet säilytysajan (d) ja säilytyslämpötilan ($^{\circ}\text{C}$) tulona. Peltoalueen näytteistä havaittiin, että jos astevuorokausia on likipitään saman verran, puristuskokeessa saatu lujuus on likipitään yhtä suuri. Tätä tietoa voidaan hyödyntää koekappaleiden testauksen nopeuttamisessa. Esimerkiksi, sen sijaan että säilytetäisiin koekappaletta 28 vuorokautta kylmähuoneessa 6°C :ssa, olisi mahdollista käyttää koekappaletta, jota on säilytetty seitsemän vuorokautta 22°C :ssa, ja lujuus olisi likipitään sama. Aihe vaatii kuitenkin lisätutkimuksia ja astepäivä-lujuuskuvaajan muodon selvittämistä eri maalajeille ja sideaineille.

Vedenläpäisevyysödometrituloksista selvitettiin ödometrirenkaaseen sullotun kuormittamattoman näytteen laskennallinen vedenläpäisevyys. Kaikkien peltoalueen ja ramppisilmukan näytteiden laskennalliset vedenläpäisevyydet ilman kuormitusta alittivat tavoitteen $k \leq 6,7 \times 10^{-10} \text{ m/s}$. Stabiloimattomien näytteiden laskennalliset vedenläpäisevyydet ilman kuormitusta olivat välillä $1,90 \times 10^{-10} \dots 5,93 \times 10^{-10} \text{ m/s}$. Kolmella ja viidellä prosentilla sementtiä stabiloitujen näytteiden läpäisevyydet olivat $2,69 \times 10^{-10}$ ja $1,11 \times 10^{-10} \text{ m/s}$.

Läjityksen näytteiden 1, 6 ja 8 laskennalliset vedenläpäisevyydet ilman kuormitusta olivat suuremmat kuin tavoitearvo, mutta näytteen tiivistyessä saavuttivat jo ensimmäisessä vedenläpäisevyyskokeessa 50 kPa:n kuormalla tavoitearvon. Näytteiden muodonmuutokset olivat suuria, ensimmäiseen vedenläpäisevyyskokeeseen mennessä kaikkien läjityksen vedenläpäisevyysnäytteiden, 1, 6 ja 8, muodonmuutokset olivat yli 20 %. Läjityksen näytteille ei tehty vedenläpäisevyyskokeita stabiloituna.

Vedenläpäisevyyskokeiden perusteella kaikki testatut näytteet hyvin tiivistettyinä todennäköisesti soveltuvat tiivistekerroksen materiaaliksi. Lisäkokeita tehdään vielä, kun tiivistyskerroksessa käytettävä materiaali varmistuu. Läjityksestä otettuihin näytteisiin on todennäköisesti lisättävä sementtiä työstettävyyden parantamiseksi. Sementin lisääminen pienentää samalla materiaalin vedenläpäisevyyttä.

Peltoalueen näytteelle tehdyt Standard Proctor -kokeet osoittivat, että ödometrikokeen sullontatyö vastasi likipitään Proctor-kokeen tiivistystulosta – tuloksiksi saadut kuivairto-
tiheydet olivat likipitään samat. Näytteen vesipitoisuuksien ollessa > 40 % kaikkien näytteiden kuivairtotiheydet olivat kyllästysrajan tuntumassa.

Lähdeluettelo

Anagnostopoulos, C. & Stavridakis E. 2003. Physical and engineering properties of a cement stabilized soft soil treated with acrylic resin additive. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 8D [Viitattu 6.9.2006] Saatavissa: <http://www.ejge.com/>

Attom, M. & Al-Sharif, M. 1998. Soil Stabilization with Burned Olive Waste. Applied Clay Science. [Verkkolehti] Vol. 13:3, s. 219-230 [Viitattu 18.6.2006] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/>

Benson, C., Daniel, E., Boutwell, G. 1999. Field performance of compacted clay liners. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 125:5, s. 390-403

Basha, E., Hashim, R., Mahmud, H., Muntohar, A. 2005. Stabilization of Residual Soil with Rice Husk Ash and Cement. Construction and Building Materials. [Verkkolehti] Vol. 19:6, s. 448-453 [Viitattu 18.6.2006] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/>

Chew, S., Kamruzzaman, A., Lee, F. 2004. Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. [Verkkolehti] Vol. 130:7. s. 696-706 [Viitattu 15.6.2006] Saatavissa: <http://ascelibrary.aip.org/>

Estudillo, S. 2003. Permeability of Finnish Soft Clay and His Application in Consolidation and Impervious Barriers. Lopputyö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo. 59 s.

Finnsementti Oy. 2006. <http://www.finnsementti.fi> [Viitattu 16.6.2006]

Forsman, J. 1998. Savi kaatopaikan pohjan ja pinnan mineraalitiivisteinä. Espoo: Viatek Oy. 52 s.

Forsman, J. & Hakari, M. 2006. Vuosaaren satama, Melumäki, Pohjan, luiskan, pinnan ja pystyeristeen mineraalinen tiivistyskerros, Melu 2 -urakka (vuoden 2005 työt) Laadunvalvontaraportti 5.1.2006. Espoo: Ramboll Finland Oy. 11 s.

Forsman, J. & Hakari, M. 2004. Vuosaaren satama, Melumäki, Pohjan mineraalinen eriste, Rakennusvaihe 1 ja 3A, Laadunvalvontaraportti 16.12.2004. Espoo: Ramboll Finland Oy. 9 s.

Goh, A. & Tay, J-H. 1993. Municipal Solid-Waste Incinerator Fly Ash for Geotechnical Applications. Journal of Geotechnical Engineering. [Verkkolehti] Vol. 119:5, s. 811-825 [Viitattu 25.6.2006] Saatavissa: <http://scitation.aip.org/>

Hautala, A. 1981. Kalkkipilarimenetelmän käyttö ratapenkereen vahvistamisessa humuspitoisessa maassa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo.

Helenius, J., Karvonen, E., Ipatti, A. 1992. Turvelentotuhkan ominaisuudet, hyötykäyttö ja ympäristövaikutukset. Helsinki: Imatran voima Oy. 42 s. T&K-tiedotteita, IVO-B-03/92

Holm, G., Tränk, R., Ekström, A., 1987. Kalkpelare med gips som tillsatsmedel. Teoksessa: Ekström, A., Holm, G., Tränk, R., Åhnberg, H.. Kalkpelare. Linköping, Sverige: Statens geotekniska institut. s. 11-49. Rapport 30

Ideachip Oy. 2006. www.allu.net [15.5.2006]

Ingles, O. & Metcalf, J. 1972. Soil Stabilization – Principles and Practice. Australia: Butterworths. 374 s.

ISO/TS 17892-12:2004 2004. Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 12: Determination of Atterberg limits. 12 s.

Janz, M. & Johansson, S-E. 2002. The Funktion of Different Binding Agents in Deep Stabilization. Linköping, Sweden: Swedish Deep Stabilization Research Center. 52 s. Raport 9 English Translation. Saatavissa: <http://www.swedgeo.se/Sd/publi.asp>

Jauhiainen, P. & Vahanne, P. 2001. Kivikon liikuntapuisto, lyijypitoisten maa-ainesten loppusijoitusalue – Pohjarakenteiden ja tasausaltaan rakentamisen laadunvalvonta. Espoo: VTT. 9 s. Tutkimusselostus N:o 312-01/KET18

Jelusic, N. 2000. Masstabilisering. Linköping, Sverige: Svensk Djupstabilisering. 154 s. Rapport 5

Jirathanathaworn, T., Nontananandh, S., Chantawarangul, K. (2004) Stabilization of clayey sand using fly ash mixed with small amount of lime. Geotechnical Engineering Research and Development Center, Thailand. [Viitattu 14.8.2006] Saatavissa: http://gerd.eng.ku.ac.th/information/article_NCCE9/GTE20.pdf

Jätelaki. 1993. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1993/19931072> [Viitattu 13.6.2006]

Karlstedt, P. 1993. Ylijäämäsaven massastabilointi. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo. 70 s.

Korhonen, K-H. 1967. Geotekniset laboratoriotutkimusohjeet, ödometrikoe. Espoo: VTT. 40 s.

Kukko, H. 2000. Stabilization of Clay with Inorganic By-Products. Journal of Materials in Civil Engineering. [Verkkolehti] Vol. 12:4. s. 307-309. [Viitattu 3.8.2006] Saatavissa: <http://scitation.aip.org/>

Kuusipuro, K. 1993. Nopeutettu koemenetelmä stabiloidun maan lujuuden arviointiin. Diplomityö. Rakentamistekniikan osasto, Oulun yliopisto. Oulu. 59 s.

Lahtinen, P., Kolisoja, P., Kuula-Väisänen, P., Leppänen, M., Jyrävä, H., Maijala, A., Ronkainen, M. 2005. UUMA-esiselvitys. Helsinki: Ympäristöministeriö, Ympäristönsuojeluosasto. 121 s. Suomen ympäristö 805. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/julkaisut>

Mäkelä, E., Wahlström, M., Pihlajaniemi, M., Mroueh, U-M., Keppo, M., Rämö, P. 1998. Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteet ja lentotuhka maarakentamisessa: jatkotutkimus. Espoo: VTT. 61 s. VTT Tiedotteita 1952

Mäkelä, H. & Höynälä, H. 2000. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa: materiaalit ja käyttökohteet. Helsinki: Tekes. 97 s. Teknologia katsaus 91/2000.

Mäkelä, H., Höynälä, H., Halkola, H., Kettunen, A. 2000a. Viikin savikatu. Helsinki: Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto. 61 s. GEO 81/2000

Mäkelä, H., Höynälä, H., Halkola, H., Kettunen, A. 2000b. Massastabiloitujen ylijäämäsavien käyttö maarakenteissa. Helsinki: Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto. 104 s. GEO 82/2000

National Lime Association 2004. Lime-treated soil construction manual, lime stabilization & lime modification. 11. painos. USA: National Lime Association. 41 s. Bulletin 326. Saatavissa: <http://www.lime.org/publications.html>

Nordkalk Oyj Abp. 2006. <http://www.nordkalk.com/servlet/startpage.jsp> [Viitattu 19.6.2006]

Portland Cement Association. 2006. <http://www.cement.org> [Viitattu 16.6.2006]

Prusinski, J. & Bhattacharja, S. 1999. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. Transportation Research Record 1652. s. 1-14. Saatavissa: <http://www.cement.org/pavements/resources.asp>

Ravaska, O., Palolahti, A., Lojander, M. 2003. Natural Clay Barriers in Finland. Teoksessa: XIII Eur. Conf. of Soil Mechanics and Geotech. Eng.. Prague 25.–28.8.2003. Prague. s. 547-552.

Rekonen, R. 1993. Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo. 76 s.

Rogbeck, Y. 1997. Masstabilisering av väg 590, Askersund. Linköping, Sverige: Svensk djupstabilisering. 62 s. Arbetsrapport 7.

Rogbeck, Y., Larsson, L., Åhnberg, H., Rodenstam, S. 2006. Aska som bindemedel i markstabilisering, koncept (28.6.2006). Sverige: Statens geotekniska institut, Nordkalk Ab. 29 s.

Rämö, P. 1999. Ylijäämämaiden ja kivihiilivoimalaitosten sivutuotteiden hyötykäyttö maarakentamisessa. Helsinki: Tekes. 68 s. Teknologiakatsaus 70/99.

SITO. 2005. Ylijäämämässatarkastelu. Helsinki: Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto. 37 s. Saatavissa: <http://www.hel2.fi/helakanslia/Kaupunginhallitus/Esityslistat/liitteet/060170054.pdf>

Statens institut för byggnadsforskning 1972. Kornfördelning. Förslag till geotekniska laboratorieanvisningar, del 4. Stockholm, Sverige: Statens institut för byggnadsforskning. 23 s.

Suomen geoteknillinen yhdistys. 1985. GLO-85 Geotekniset laboratorio-ohjeet 1. Luokituskokeet. Espoo: Rakentajain Kustannus Oy. 107 s.

Suomen ympäristökeskus. 2002. Kaatopaikan tiivistysrakenteet. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 144 s. Ympäristöopas 36.

Tie- ja vesirakennushallitus. 1986. Kuivakuorisavien ja silttien käyttö tiepenkereissä. Helsinki: Tie- ja vesirakennushallitus. 32 s. TVH 723855

Tiehallinto. 2001. Syvästabiloinnin suunnitteluohje. Helsinki: Tiehallinto. 49 s. Saatavissa: <http://www.tiehallinto.fi/julkaisut>

Työterveyslaitos. 2006. Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet: kalsiumoksidi. [Viitattu 6.6.2006] Saatavissa: <http://www.ttl.fi/internet/ova/kalsiumoksidi.html>

Uudenmaan ympäristökeskus, 2004. Ympäristölupapäätös UUS-2003-Y-136-111. 37 s.

Viljas, P. 1996. Kalkki-sulfaattiaktivoitu masuunikuonajauhe stabiloinnin sideaineena. Lisensiaatintyö. Oulun yliopisto, rakentamistekniikan osasto. 67 s.

Vuosaaren satamahanke. 2005a. Satamauutiset. [Verkkolehti] 1/2005. [Viitattu 15.9.2006] Saatavissa: http://www.vuosaarensatama.fi/linked/fi/tiedotteet/1_2005.pdf

Vuosaaren satamahanke. 2005b. Kuva-arkisto, rakennusaikaiset kuvat 2005. [Viitattu 18.9.2006] Saatavissa: http://www.vuosaarensatama.fi/mediapankki/mediapankki_1_3_3.html

Wahlström, M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Leino-Forsman, H., Mäkelä, E., Olin, M. 1999. Maarakentamisessa käytettävien teollisuuden sivutuotteiden riskinarviointi. Espoo: VTT. 134 s. VTT Tiedotteita 1995

Åhnberg, H. 2006. Strength of stabilised soils – A Laboratory Study on Clays and Organic Soils Stabilised with Different Types of Binder. Doctoral Thesis. Lund University, Department of Construction Sciences. Lund. 80 s. + papers I-VII.

Åhnberg, H., Johansson, S-E., Retelius, A., Ljungkrantz, C., Holmqvist, L., Holm, G. 1995. Cement och kalk för djupstabilisering av jord: En kemisk – fysikalisk studie av stabiliseringseffekter. Linköping, Sverige: Statens geotekniska institut. Rapport No 48.

Vedenläpäisevyysödometrikokeiden numerointi

näyte	syvyys (m)	laboratorio- koenumero
Ramppisilmukka, 16.6.2006		
KK4	2,5-3,0	4760ks
KK6	2,0-2,5	4761ks
Peltoalue, 21.6.2006		
KK2	0,5-1,5	4764ks
KK2	1,5-2,4	4762ks
KK3	1,2-2,6	4765ks
KK5	0,5-1,1	4766ks
KK5	1,1-2,5	4763ks
KK3*s3	0,4-2,6	4769kssw
KK3*s5	0,4-2,6	4768kssw
Läjitysalue, 29.8.2006		
läj. 1	-	4770ks
läj. 6	-	4771ks
läj. 8	-	4772ks

* yhdistetty KK3 (0,4-1,2) ja KK3 (1,2-2,6)

s3, s5 lisätty sementtiä 3 tai 5 %

Koenumerossa:

k = vedenläpäisevyyskoe

s = häiritty näyte

ss = häiritty näyte, johon lisätty sementtiä

w = vedellä kyllästetty

Peltoalueen näyte KK3 (21.6.06)														
KK3, koe-kappale	side-ainem.	puris-tusikä	näytteen koko	lämpö-tila	aste-päivät	max voima	max voima	puristus-lujuus	leikkaus-lujuus	vesipit.	tiheys	huokos-luku	S _r	puristuma
	(%)	(d)	(mm/mm)	(°C)	(°Cd)	(kg)	(N)	(kPa)	(kPa)	(%)	(kg/m ³)	(-)	(%)	(mm)
L1	3	7	20/40	22	154	15,72	154,12	490,57	245,29	39,5	1843,4	1,07	100,0	0,9142
L2	3	7	20/40	22	154	10,52	103,14	328,29	164,15	39,6	1796,0	1,11	96,5	0,6496
L3	3	7	20/40	22	154	12,71	124,63	396,70	198,35	39,3	1788,7	1,12	95,0	0,9973
L4	3	7	20/40	6	42	7,38	72,34	230,25	115,13	40,9	1814,9	1,11	99,8	0,7416
L5	3	7	20/40	6	42	5,54	54,29	172,82	86,41	40,8	1805,6	1,11	98,9	0,8976
L6	3	7	20/40	6	42	7,64	74,94	238,53	119,27	40,4	1798,8	1,11	98,0	0,4693
L7	3	28	20/40	22	616	20,49	200,90	639,49	319,74	35,3	1876,3	0,96	99,6	1,7377
L8	3	28	20/40	22	616	23,50	230,51	733,73	366,86	36,1	1832,5	1,01	95,9	1,2339
L9	3	28	20/40	22	616	38,91	381,62	1214,74	607,37	33,1	1855,5	0,95	94,4	1,7428
L10	3	28	20/40	6	168	11,62	114,00	362,87	181,44	39,2	1821,4	1,07	98,8	0,5447
L11	3	28	20/40	6	168	19,15	187,81	597,80	298,90	38,7	1789,0	1,10	94,8	0,4974
L12	3	28	20/40	6	168	10,36	101,64	323,52	161,76	39,1	1857,3	1,06	100,0	0,5076
L13	5	7	20/40	22	154	21,62	212,05	674,99	337,49	38,1	1870,4	1,03	100,0	0,6304
L14	5	7	20/40	22	154	32,45	318,20	1012,86	506,43	37,4	1857,5	1,01	100,0	0,9053
L15	5	7	20/40	22	154	32,65	320,23	1019,32	509,66	37,3	1785,3	1,08	93,0	0,5242
L16	5	7	20/40	6	42	17,07	167,37	532,77	266,38	38,3	1846,7	1,04	100,0	0,7800
L17	5	7	20/40	6	42	20,83	204,25	650,15	325,07	38,1	1803,9	1,07	96,2	0,4386
L18	5	7	20/40	6	42	15,12	148,31	472,09	236,04	38,4	1827,2	1,05	99,1	0,3056
L19	5	28	20/40	22	616	55,79	547,11	1741,52	870,76	35,3	1853,2	0,98	97,1	0,9922
L20	5	28	20/40	22	616	55,18	541,17	1722,59	861,29	34,4	1812,4	1,00	93,4	1,0702
L21	5	28	20/40	22	616	48,19	472,57	1504,24	752,12	36,1	1815,2	1,03	94,4	0,9321
L22	5	28	20/40	6	168	28,36	278,09	885,19	442,59	38,0	1792,3	1,09	94,3	0,8925
L23	5	28	20/40	6	168	33,05	324,13	1031,74	515,87	37,9	1748,9	1,14	89,9	0,6419
L24	5	28	20/40	6	168	35,77	350,78	1116,57	558,28	38,0	1912,8	1,02	100,0	0,6253

Läjäytysalueen näytteet läj. 6, läj. 5 ja läj. 8 (28.9.06)														
Läjäy- koe-	side- ainem.	puris- tusikä	koko	lämpö- tila	aste- päivät	max voima	max voima	puristus- lujuus	leikkaus- lujuus	vesipit.	tiheys	huokos- luku	S _r	puristuma
kappale	(%)	(d)	(mm/mm)	(°C)	(°Cd)	(kg)	(N)	(kPa)	(kPa)	(%)	(kg/m ³)	(-)	(%)	(mm)
läj. 6														
s1	3	7	50/100	6	42	11,65	114,26	58,19	29,10	61,0	1612,7	1,70	97,1	1,3119
s2	3	7	50/100	6	42	15,01	147,21	74,97	37,49	60,3	1615,1	1,68	96,9	1,5715
s3	3	7	50/100	6	42	18,83	184,68	94,06	47,03	61,3	1635,4	1,67	99,4	1,6980
s4	3	7	20/40	6	42	2,01	19,72	62,76	31,38	59,3	1648,6	1,62	99,0	0,5946
s5	3	7	20/40	6	42	2,66	26,11	83,12	41,56	59,8	1655,5	1,62	100,0	0,6969
s6	3	7	20/40	6	42	3,04	29,78	94,78	47,39	59,3	1669,9	1,60	100,0	0,5933
s7	3	28	20/40	6	168	3,42	33,57	106,86	53,43	60,3	1645,6	1,64	99,6	0,7237
s8	3	28	20/40	6	168	3,46	33,95	108,07	54,03	60,1	1640,8	1,64	98,9	0,6022
s9	3	28	20/40	6	168	4,14	40,56	129,11	64,55	60,4	1642,0	1,65	99,1	0,5102
läj. 5														
s14	3	7	50/100	6	42	15,17	148,74	75,75	37,88	62,1	1610,6	1,72	97,5	1,3848
s15	3	7	50/100	6	42	15,36	150,63	76,72	38,36	62,4	1613,4	1,72	98,0	1,4283
s16	3	7	50/100	6	42	14,62	143,38	73,02	36,51	62,7	1605,3	1,74	97,4	1,2838
s17	3	7	20/40	6	42	2,10	20,55	66,41	32,70	61,3	1635,2	1,66	99,5	0,9270
s18	3	7	20/40	6	42	2,41	23,61	75,16	37,58	61,2	1617,5	1,70	97,1	0,4117
s19	3	7	20/40	6	42	2,40	23,51	74,84	37,42	61,2	1619,9	1,69	97,6	0,9590
s20	3	28	20/40	6	168	2,88	28,25	89,93	44,96	61,7	1658,1	1,67	100,0	0,3938
s21	3	28	20/40	6	168	2,32	22,77	72,48	36,24	62,0	1640,9	1,67	100,0	0,4156
s22	3	28	20/40	6	168	2,72	26,63	84,77	42,38	62,4	1660,2	1,69	100,0	0,5882
läj. 8														
s27	3	7	50/100	6	42	14,10	138,29	70,43	35,21	70,6	1547,5	1,98	96,4	1,7939
s28	3	7	50/100	6	42	13,13	128,79	65,59	32,80	71,2	1558,0	1,97	97,8	1,4883
s29	3	7	50/100	6	42	13,57	133,07	67,77	33,89	71,3	1568,7	1,95	98,8	1,5996
s30	3	7	20/40	6	42	1,03	10,06	32,04	16,02	69,9	1587,4	1,90	99,6	0,6572
s31	3	7	20/40	6	42	1,62	15,91	50,64	25,32	69,0	1591,8	1,88	99,0	0,6163
s32	3	7	20/40	6	42	1,07	10,47	33,33	16,67	68,6	1582,1	1,89	98,0	0,7557
s33	3	28	20/40	6	168	2,25	22,06	70,22	35,11	68,7	1611,0	1,85	100,0	0,5856
s34	3	28	20/40	6	168	1,88	18,43	58,67	29,33	69,3	1611,2	1,87	100,0	0,5741
s35	3	28	20/40	6	168	2,11	20,70	65,90	32,95	69,4	1617,9	1,87	100,0	0,6649